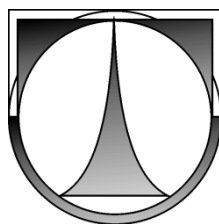


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



Diplomová práce

2009

Bc. David Bílek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálů

Studijní program: MN2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

PARAMETRIZACE ZAŘÍZENÍ TELIT

PARAMETERIZATION OF APPARATUS TELIT

KMT – 248

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
Konzultant diplomové práce:

Počet stran: 123
Počet příloh: 28
Počet obrázků: 40
Počet tabulek: 21
Počet grafů: 24

Datum odevzdání: 5. 6. 2009

ANOTACE

Cílem této práce je parametrizace zařízení TELIT, které umožňuje pomocí spojení ultrazvukové a magnetické strukturoskopie nedestruktivní stanovení pevnosti při měření lokálních oblastí odlitků z grafitických litin.

Parametrizací se rozumí stanovení optimálního postupu k získání co nejspolehlivějších konstant pro matematický model pevnosti. Konstanty jsou realizovány z naměřených dat pomocí logaritmické metody regresní analýzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Strukturoskopie, litina, kombinovaný strukturoskop (TELIT)

ABSTRACT

The objective of this assignment is parameterization of apparatus TELIT. This equipment is capable to determine undestructive quotas of strength on local areas of cast graphic alloys due to connection and exploitation of ultrasonic and magnetic structuroscopy.

Parameterization means a process which is capable to achieve optimal procedure and obtain the most accurate constants for mathematical model of strength. Constants are then realized from gained data's with utilization of logarithmic method of regressive analysis.

KEYWORDS

Structuroscopy, cast iron, combination structuroscop (TELIT)

PROHLÁŠENÍ

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Horní Branné, dne 30. května 2009

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. V. Kubíčkovi, prof. Ing. M. Olehlovi, CSc. a hlavně Doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za vedení, cenné rady a podporu při tvorbě diplomové práce.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD.....	9
1.1 K zadání	9
2. ULTRAZVUKOVÁ STRUKTUROSKOPIE	10
2.1 Základní pojmy ultrazvuku.....	10
2.1.1 Rychlost šíření ultrazvuku	10
2.1.1.1 Tuhé látky	10
2.1.2 Akustický tlak	12
2.1.3 Útlum ultrazvukových vln	12
2.2 Aplikace ultrazvuku	14
2.2.1 Metody defektoskopických ultrazvukových zkoušek	14
2.2.1.1 Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln (měření tloušťky)	15
2.2.1.2 Sondy	16
2.2.2 Zjišťování mechanických vlastností materiálu	18
3. MAGNETICKÁ STRUKTUROSKOPIE.....	21
3.1 Základní pojmy magnetizmu.....	21
3.2 Aplikace magnetizmu	25
3.2.2 Zjišťování mechanických vlastností materiálu	26
3.2.2.1 Měření magnetickým bodovým polem	27
4. KOMBINOVANÝ STRUKTUROSKOP TELIT	29
4.1 Magnetický tvrdoměr DOMENA	32
4.2 Školní zařízení SYLIT.....	33
5. ZÁKLADY REGRESNÍ ANALÝZY	33
5.1 Výpočet spojnic trendu – Rovnice	34

5.1.1	Lineární.....	34
5.1.2	Logaritmická.....	34
5.1.3	Exponenciální	34
5.1.4	Mocninná	34
5.2	Korelace	35
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
6.1	Měření zbytkového magnetizmu M.....	40
6.1.1	Vzorky slévárny FERAMO Brno.....	40
6.1.2	Vzorky slévárny FEREX Liberec	41
6.2	Měření tvrdosti.....	42
6.2.1	Vzorky slévárny FERAMO Brno.....	42
6.2.1.1	Strukturní mikroanalýza	44
6.2.2	Vzorky slévárny FEREX Liberec	47
6.3	Měření akustické dráhy Lu, výpočet rychlosti ultrazvukových vln c_L	48
6.4	Naměřené a vypočtené hodnoty mechanických vlastností (E_0 , R_m , R_p , ...) u zkoumaných vzorků.....	53
7.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	54
7.1	Člen první, hodnota L/L_u	55
7.2	Člen druhý, hodnota zbytkové magnetizace M.....	66
7.3	Měření meze pevnosti v tahu R_m	76
7.4	Matematické modely pro nedestruktivní stanovení tvrdosti HB, konstanty A, B pro přístroj DOMENA.....	83
7.5	Výstupní naměřené hodnoty pro získání konstant do matematického modelu pevnosti R_m	87
7.5.1	Regresní analýza modelu pevnosti R_m a jeho řešení	88
8.	ZÁVĚR.....	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
9.	PŘÍLOHY	94

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Název	Jednotka
c	rychlost šíření vlny	$[\text{m.s}^{-1}]$
t	čas	$[\text{s}]$
f	frekvence	$[\text{Hz}]$
λ	vlnová délka	$[\text{m}]$
μ	poissonovo číslo, permeabilita	$[-]$
E	modul pružnosti v tahu	$[\text{Pa}]$
G	modul pružnosti ve smyku	$[\text{Pa}]$
ρ	hustota prostředí	$[\text{kg.m}^{-3}]$
α	součinitel útlumu	$[\text{dB.mm}^{-1}]$
p	akustický tlak	$[\text{Pa}]$
P	amplituda akustického tlaku	$[\text{Pa}]$
L	skutečná tloušťka	$[\text{mm}]$
L_u	dráha ultrazvukových vln	$[\text{mm}]$
ρc_L	akustický vlnový odpor	$[\text{Pa.s.m}^{-1}]$
B	magnetická indukce	$[\text{T}]$
Φ	magnetický indukční tok	$[\text{Wb}]$
H	intenzita magnetického pole	$[\text{A/m}]$
$M(H_r)$	magnetizace	$[\text{A/m}]$
J	polarizace	$[\text{T}]$
K	magnetická susceptibilita	$[-]$
HB	tvrdost dle Brinella	$[-]$
R_m	mez pevnosti v tahu	$[\text{MPa}]$
atd.	atak dále	
a pod.	a podobně	
popř.	popřípadě	
tzv.	tak zvaný	
resp.	respektive	

1. ÚVOD

Téma této diplomové práce souvisí s bakalářskou prací „Výzkum tloušťkoměru DIO 570 v ultrazvukové strukturoskopii litin“, kterou jsem obhajoval v roce 2006. Jedná se o pokračování dlouhé cesty nedestruktivní strukturoskopie, která je předmětem neustálého vývoje.

Obecně strukturoskopie kvantifikuje a využívá vztah mezi fyzikální měřenou veličinou a mechanickou vlastností či parametrem strukturní fáze. V této práci se budou ve strukturoskopii litin uplatňovat fyzikální principy metod ultrazvukových a magnetických, platících pro feromagnetika.

V současné době je neustálý tlak odběratelů na dokládání mechanických vlastností přímo na odlitcích. Toho, aniž by se musel odlitek podrobit destruktivnímu zkoušení, se dá docílit nedestruktivní strukturoskopií. Ta umožňuje spolehlivé určení konkrétní hodnoty vlastnosti a neshodného odlitku, proto se stává nedestruktivní strukturoskopie součástí vnitřní jistoty kvality materiálu pro slévárnu.

Zařízení TELIT bylo vyvinuto jelikož, pro určení konkrétní mechanické vlastnosti jako je mez pevnosti R_m , mez kluzu R_p nebo tažnosti A , potřebujeme použít kombinované zařízení, které spojí magnetickou metodu s akustickou. Spojením těchto metod dojde ke komplexnímu a urychlenému popisu mechanických vlastností lokálních oblastí odlitků z grafitických litin.

1.1 K zadání

Cílem této práce je parametrizovat neboli stanovit optimální postup k získání co nejvěrohodnějších konstant do matematického modelu pevnosti R_m . Nejvěrohodnější konstanty jsou takové, které zvyšují koeficient korelace, resp. míru spolehlivosti tohoto modelu. Konstanty jsou realizovány z naměřených dat pomocí logaritmické metody regresní analýzy. Korelaci snižuje jak samotné nastavení zařízení TELIT, tak hlavně vlastnosti měřeného odlitku z grafitické litiny.

2. ULTRAZVUKOVÁ STRUKTUROSKOPIE

2.1 Základní pojmy ultrazvuku

Ultrazvuk jsou mechanické kmity částic prostředí, které mají frekvenci vyšší než 20 kHz. Podle účinku známe dva druhy ultrazvuku a to aktivní a pasivní. *Aktivním ultrazvukem* jsou ultrazvukové vlny, u nichž se při svém šíření prostředí projevují fyzikální nebo chemické účinky, jako je tomu při ultrazvukovém čištění, vrtání, svařování atd. *Pasivní ultrazvuk* se od aktivního liší hlavně svým menším, obvykle zanedbatelným výkonem. Používá se na zjišťování vnitřních vad materiálu, v ultrazvukové měřicí technice a v neposlední řadě i diagnostice v lékařství. V této práci se budeme zabývat jen ultrazvukem pasivním, který se vyznačuje malými amplitudami kmitajících částic, které se nijak neliší od sinusového tvaru. [1]

2.1.1 Rychlost šíření ultrazvuku

2.1.1.1 Tuhé látky

Tuhé látky se liší od kapalin a plynů mnohem vyššími meziatomárními vazebnými silami, a proto snášejí i smykové namáhání. V důsledku toho jsou tyto látky jediné, které mohou přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. [2]

Rychlost šíření ultrazvuku je charakteristická pro různé typy vlnění a závislá na rozměrech tuhého prostředí, kterým se ultrazvuk (vlnění) šíří. Zároveň je také rychlost závislá na elastických konstantách materiálu. Izotropní tělesa jsou charakterizována dvěma nezávislými konstantami pružnosti a krystaly mají více než dvě konstanty pružnosti. Počet konstant vzrůstá s klesající souměrností. [1]

Rychlost šíření podélných vln c_L :

a) v neohraničeném prostředí - rozměr tělesa je mnohem větší než délka vlny

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \quad (1)$$

b) v prostředí, kde jeden rozměr, kolmý na směr šíření, je ohraničen (deska)

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1-\mu^2}} \quad (2)$$

c) v prostředí, kde dva rozměry kolmé na směr šíření jsou ohraničeny (tyč)

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Rychlost šíření příčných vln v neohraničeném prostředí c_T :

$$c_L = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (4)$$

Tabulka 1 – Rychlost šíření podélných a příčných vln v některých pevných látkách

Prostředí	Rychlost šíření ultrazvukových vln c [m.s ⁻¹]	
	Podélných c_L	Příčných c_T
Hliník	6320	3080
Litina	3500 až 5600	2200 až 3200
Měď	4700	2260
Mosaz	3830	2123
Ocel	5900 až 6000	3260
Olovo	2160	700
Stříbro	3600	1590
Wolfram	5460	2620
Zlato	3240	1200

2.1.2 Akustický tlak

Při průchodu ultrazvukové vlny prostředím vzniká akustický tlak p , který je s akustickou rychlostí c vázán vtahem:

$$p = z \cdot c \quad (5)$$

Kde z charakterizuje měrnou akustickou impedanci. Nazýváme ji také akustickým vlnovým odporem daným výrazem $\rho \cdot c$. Tato veličina je významným činitelem popisujícím prostředí a majícím podstatný vliv na odraz a přestup ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí.

2.1.3 Útlum ultrazvukových vln

Ultrazvukové vlny, které prochází prostředím, ztrácejí svoji energii a akustický tlak. Vlastní útlum ultrazvukových vln je dvojího druhu:

- a) pohlcování (absorpce) – Mechanická energie se mění v tepelnou. Tento útlum způsobuje vnitřní tření kmitajících částic. Pohlcování je přímo úměrné frekvenci.
- b) rozptyl – Vyskytuje se zejména v tuhých látkách, protože většina z nich není naprosto homogenní a izotropní, takže se v nich vyskytují rozhraní, kde dochází k odrazu, lomu a ohybu ultrazvukových vln. Závisí na poměru velikosti zrna \bar{D} a délky vlny λ .

Útlum omezuje možnost zjišťovat v materiálu malé vady a snižuje rozlišovací schopnost v závislosti na tloušťce. Vliv útlumu lze omezit jedině použitím nižší frekvence. Nižší frekvence je nutno volit pro zkoušení látek s hrubou strukturou nebo materiálů nehomogenních jako je beton, keramika, horniny, dřevo a litina s lupínkovým grafitem. Pro technické materiály platí mezi útlumem a frekvencí vztah $\alpha = c \cdot f^m$ kde c a m , jsou konstanty závislé na materiálu. [1]

Mezi útlumem kovového materiálu se strukturou tvářenou nebo litou je značný rozdíl. Tvářením se snižuje velikost zrna, to způsobí snížení útlumu a zvýšení rychlosti šíření ultrazvuku. Proto mezi útlumem a rychlostí šíření je nepřímo úměrná závislost. Materiály s lící strukturou, např. odlitky nebo svary se projevují velkým zrnem, a proto jejich útlum bývá až o řád vyšší. Také orientace zrn lící struktury má vliv na útlum ultrazvuku. Převažující vliv na útlum v polykrystalických látkách má rozptyl a proto útlum lze sledovat i podle šumu, který vzniká odrazy od zrn materiálu. [1]

Pozn.: Velikost dráhy akustické vlny závisí na labyrintu grafitických útvarů. Čím více útvary matrici oslabují (čím jsou štíhlejší), jak je tomu u litiny GJL, tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou (tloušťkou prozvučované stěny) L . Rychlost zvuku c_L tak klesá (viz vztah 7) a dochází k nepřesnostem měření (zjištění chybného tvaru grafitu v litině, špatné určení jakostní třídy při kontrole litiny s lupínkovým grafitem – viz ultrazvuková strukturoskopie).

Tabulka 2 – Útlum ultrazvuku v některých prostředích při frekvenci 2MHz a teplotě 20°C

Prostředí	Útlum vln α (dB.mm ⁻¹)	
	Podélných α_L	Příčných α_T
Ocel feritická	0,01 až 0,1	0,02 až 0,3
Ocel austenitická	0,03 až 0,4	0,1 až 0,5
Hliník	0,001 až 0,04	0,003 až 0,04
Hořčík	$5 \cdot 10^{-4}$ až $3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3} až $8 \cdot 10^{-3}$
Měď	0,05 až 0,2	-
Okenní sklo	0,006	-
Plexisklo	0,5	-
Polystyren	0,4	-
Voda	$5 \cdot 10^{-4}$	-
Litiny	až o řád vyšší než u oceli	

2.2 Aplikace ultrazvuku

Jednou možností aplikací ultrazvuku je defektoskopie, která je aplikačním oborem fyziky. Využívá všech fyzikálních principů a jejím hlavním úkolem je jednoduchým a reprodukovatelným způsobem podat informace o vnitřním stavu materiálu. Neustále dochází k jejímu rozvoji, tak jak se vyvíjí měřicí technika.

Defektoskopické zkoušky patří do skupiny tzv. zkoušek bez porušení. Ve strojírenské výrobě mají největší význam. Tyto zkoušky umožňují zjišťování skrytých povrchových i vnitřních vad, které porušují celistvost materiálu. Hlavní význam těchto zkoušek je v tom, že umožňují včasné odhalení a průkazné zjištění skrytých vad již během výrobního procesu, před dalšími výrobními operacemi. Mezi nejdůležitější defektoskopické metody patří metody prozařovací, *ultrazvukové*, *magnetické* a *indukční*, kapilární. [1]

2.2.1 Metody defektoskopických ultrazvukových zkoušek

Ultrazvuková defektoskopie má několik základních metod, z nichž každá je použitelná za určitých předpokladů. Mezi ultrazvukové metody patří metoda průchodová, odrazová, rezonanční, atd. Nejdůležitější metody z hlediska zkoušení materiálu ultrazvukem jsou v tabulce 3, z nichž pro nás nejvýznamnější je odrazová impulzová metoda. Tato metoda je všestranně použitelná a poskytuje nejvíce informací o vyšetřovaném předmětu, a to jak o jeho necelistvostech, tak i o struktuře materiálu, rozměrech apod. Do kontrolovaného prostředí se vysílají krátké impulzy, které se odrážejí od všech akustických rozhraní → aplikováno u prozařování (měření) tloušťky materiálu (viz obrázek 1).

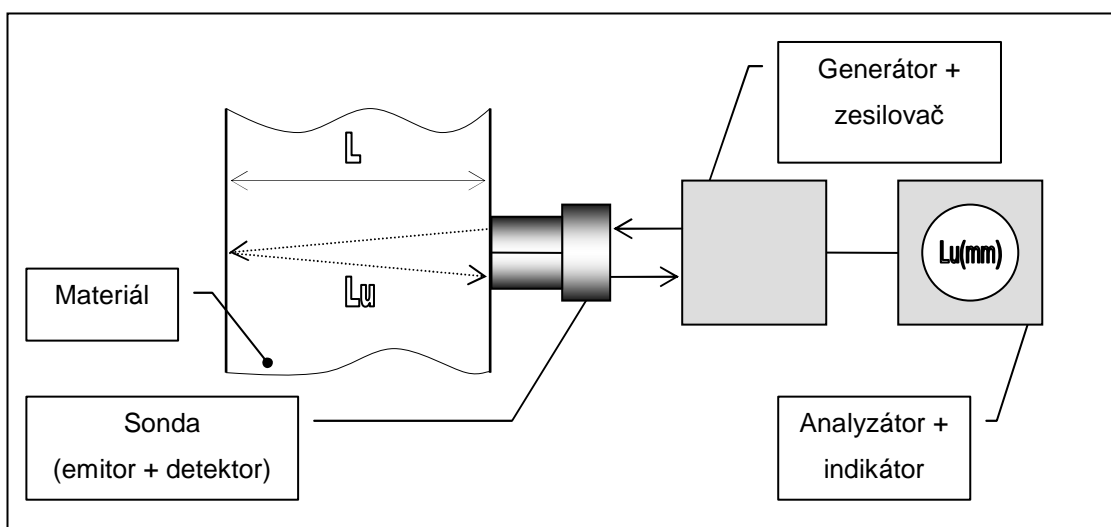
Tabulka 3 – Metody ultrazvukové defektoskopie

Druh metody	Použití
Průchodová impulsová	Tenké materiály, prostředí s vysokým útlumem
Odrážová metoda	Všeobecné použití pro zjišťování, vyhodnocení vad a měření tloušťky

2.2.1.1 Měření rychlosti šíření ultrazvukových vln (měření tloušťky)

Měření tloušťky ultrazvukem je nejjednodušší aplikací ultrazvukových vln v defektoskopii. Úzce souvisí s jejich měřením rychlosti šíření. Předpokladem pro měření tloušťky je totiž znalost rychlosti šíření v měřeném prostředí. Pro měření tloušťky v technické praxi se převážně používá, jak jsem se již zmínil, impulsová metoda, jejíž přednost se projevuje při měření tloušťky uzavřených nádob, potrubí a jiných výrobků přístupných pouze z jedné strany. [1]

K měření tloušťek stěn se používá ultrazvukových tloušťkoměrů. Princip ultrazvukového tloušťkoměru (*obrázek 1*) je založen na velmi přesném měření časové odlehlosti Δt mezi emisí krátkého akustického pulsu ultrazvukovým emitorem a jeho absorpcí detektorem. Vyslaný signál se šíří v měřeném prostředí od vstupního povrchu ke druhému rozhraní, od kterého se odráží zpět.



Obrázek 1 – Princip tloušťkoměru [1]

Principem celého měření je:

$$2Lu = c \cdot \Delta t \rightarrow Lu = \frac{1}{2} c_L \cdot \Delta t \quad (6)$$

Při určování rychlosti v měřeném materiálu, u kterého neznáme rychlost šíření ultrazvuku, vždy vycházíme ze známé rychlosti šíření pro oceli $c_{L0} \equiv 5920 \text{ m.s}^{-1}$. Rychlost ultrazvuku je důležitá pro stanovení mechanických vlastností měřeného materiálu (elastických konstant).

$$c_L = c_{L0} \cdot \frac{L}{L_u} = 5920 \cdot \frac{L}{L_u} \quad (7)$$

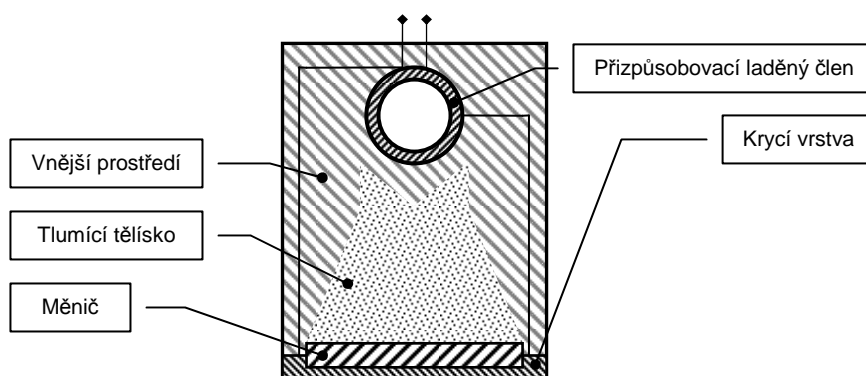
2.2.1.2 Sondy

Asi nejvýznamnější částí zařízení pro měření tloušťek materiálu jsou sondy, které vysílají a přijímají ultrazvukové impulzy. Ultrazvukové vlny lze budít piezoelektrickými, nebo elektrostrikčními měniči. Pro měření tloušťek stěn mají význam pouze piezoelektrické měniče. Mezi látky s přirozenými piezoelektrickými vlastnostmi patří např. křemen, turmalín, piezokeramika atd. Tyto látky se vyskytují ve formě krystalů.

Sonda musí splňovat několik požadavků. Mezi hlavní požadavky patří maximální možný vysílací *impulsový výkon* při minimální šířce impulsu, dostatečná *citlivost* pro příjem krátkých impulsů, dobrá *rozlišovací schopnost*, minimální *mrtvé pásmo* při jednoměničovém provozu, kdy sonda pracuje jako vysílač a vzápětí jako přijímač. Další požadavek je možnost dobrého *akustického navázání* na povrch zkoušeného materiálu při kontaktní a mezerové akustické vazbě. Akustické navázání se zprostředkovává pomocí speciálních gelů, past či mazacích tuků a slouží k tomu, aby se ultrazvukové vlny nerozšířily do okolí (útlum ultrazvukových vln).

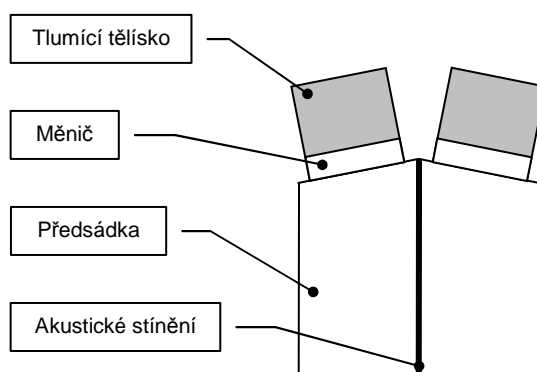
Hlavním parametrem sondy je její frekvence. *Frekvence sondy* se volí podle typu zkoušeného materiálu a jakosti povrchu. Vhodné zvolení frekvence je důležité z hlediska útlumu ultrazvukových vln. Předpokládáme, že útlum je v určitém materiálu tím menší, čím je větší vlnová délka λ použité sondy, tzn., čím nižší bude její frekvence. Sondy o nízké frekvenci mají však velkou šířku impulsu a tím i velkou mrtvou zónu. Nejběžněji používanými frekvencemi jsou 2 – 4 MHz, avšak není výjimkou zkoušení s frekvencí 10 - 15 MHz. [1]

Uvedené požadavky daly vznik různým typům a druhům ultrazvukových sond. Podle směru, kterým sonda vyzařuje vzhledem k povrchu prostředí, dělíme sondy na přímé a úhlové. Oba typy sond mohou obsahovat jeden nebo dva měniče. Podle způsobu akustického navázání jsou sondy *kontaktní* a *imerzní* (sondy s *předsádkou*). Přímé sondy vysílají a přijímají ultrazvukové impulzy kolmo na stykovou plochu. Jednoduché sondy (obrázek 2) jsou osazeny jedním piezoelektrickým měničem, který vysílá i přijímá a to podélné i příčné vlny. Nevýhodou těchto sond je velké mrtvé pásmo, proto tyto sondy nevyhovují při měření tenkých součástí, v nichž je doba průchodu porovnatelná s trváním ultrazvukového impulsu.



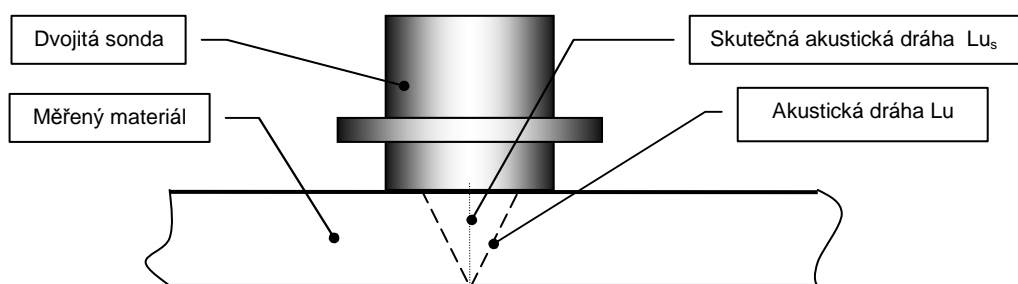
Obrázek 2 – Jednoduchá sonda [1]

Dvojité sondy (obrázek 3) slouží k měření malých tloušťek, v nichž jeden měnič slouží k vysílání a druhý k příjmu. Mezi vysílacím a přijímacím měničem dvojité sondy je *akustické stínění*, které zamezuje přeslech mezi oběma díly sondy. *Tlumící tělísko* má být co nejlépe akusticky přizpůsobeno na akustický odpor měniče, aby vícenásobné odrazy v měniči byly minimální. Nejčastěji je zhotoveno ze zrnitého wolframového prášku spojeného některou pryskyřicí, obvykle epoxidovou. *Předsádka* je akustické zpožďovací prostředí, kde je taková doba průchodu ultrazvukového impulsu, která je vhodná nebo nutná vzhledem k tloušťce zkoušeného materiálu. Zároveň chrání měnič před poškozením. Předsádka je buď tuhá, nebo kapalná. [1]



Obrázek 3 – Dvojitá sonda [1]

Při použití dvojitých sond musíme počítat s tzv. *V-efektem* neboli *V-dráhou*, která zkresluje dobu průchodu ultrazvuku měřenou součástí (obrázek 4). Projevuje se hlavně u měření tenkých součástí. U kvalitnějších tloušťkoměrů lze automaticky provádět korekci V-dráhy. [1]



Obrázek 4 – V-dráha při průchodu ultrazvukových vln prozvučovaným materiálem [1]

2.2.2 Zjišťování mechanických vlastností materiálu

Ze vztahů (1) až (4) vidíme, že při známé rychlosti podélných a příčných vln můžeme určit elastické konstanty, jako jsou modul pružnosti E , modul pružnosti ve smyku G , poissonovu konstantu μ a popř. objemový modul B . Měření rychlosti je velmi jednoduchá záležitost, protože můžeme použít buď pro tento účel speciálně konstruované přístroje anebo pomocí tloušťkoměrů a univerzálních defektoskopů měříme rychlost porovnáváním tloušťek etalonu (známe rychlost šíření příslušné vlny, je provedeno nacejchováním přístroje) a neznámého materiálu. Stanovení elastických konstant materiálu vyžaduje změřit rychlosti šíření ultrazvukových vln s velkou přesností. Proto je důležitý tvar a příprava vzorku materiálu. Ten musí mít konstantní tloušťku, dostatečné

rozměry ve směru kolmém k ose ultrazvukového svazku a dobrý povrch. Měření rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln nebývá obtížné. Měří se např. metodou odrazovou.

Měření rychlosti je důležité při zjišťování tvaru grafitu v litině, protože se zná závislost mezi těmito parametry. V litině s hrubým lístkovým grafitem je rychlost ultrazvukové vlny nejmenší (4300 m.s^{-1}) a s globulárním grafitem největší (5300 m.s^{-1}). Tzn., že je možné určovat stupeň sferoidizace grafitu, protože závislost mezi těmito dvěma krajními hodnotami je lineární. [1]

Tabulka 4 – Příklady vztahů mezi elastickými konstantami

E	G	μ
$\frac{3c_L^2 c_T^2 - \frac{4}{3} c_T^2}{c_L^2 - c_T^2}$	ρc_T^2	$\frac{c_L^2 - 2c_T^2}{2(c_L^2 - c_T^2)}$
$2G(1+\mu)$	$3B \frac{1-2\mu}{2+2\mu}$	$\frac{E}{2G} - 1$
$3B(1-2\mu)$	$\frac{3BE}{9B - E}$	$\frac{3B - 2G}{2(3B + G)}$

Mezi nejdůležitější kontroly odlitku patří kontrola nodularity neboli kontrola tvaru grafitu. Zvláště u automobilových odlitků, kde musí být stoprocentní jistota, že zkoušený odlitek má požadovaný tvar grafitu. Kontrola nodularity se provádí ultrazvukem. S použitím ultrazvukových tloušťkoměrů se vypočítá hodnota počátečního modulu pružnosti E_0 dle vztahu (8), kde poměr L/L_u závisí na rychlosti šíření ultrazvuku a konstanta K se zjistí výpočtem z měření na štíhlých tyčích a závisí na konkrétním typu prozvučovaného materiálu. Hodnota počátečního modulu pružnosti číselně charakterizuje množství a velikost grafitu v prozvučované stěně odlitku. Její zjištění je rychlý a účinný kontrolní způsob jak určovat jakosti litin přímo na odlitku. V tabulce 5 je zobrazena jakostní třída litiny s lupínkovým grafitem dle ČSN a v tabulce 6 je základní rozdělení grafitických litin podle tvaru grafitu a jejich intervaly hodnot E_0 . [1]

$$E_0 = \left(K \cdot \frac{L}{L_u}\right)^2 \quad (8)$$

Tabulka 5 – Jakostní třídy litin z lupínkového grafitu, platí pro stěny 15 - 30 mm

Jakost ČSN	42 2410	42 2415	42 2420	42 2425	42 2430
E_0 [GPa]	85	97	110	125	144

Tabulka 6 – Grafitické litiny a jejich hodnoty E_0

Název litiny	Zkratka dle EN	Počáteční modul pružnosti E_0 [GPa]
s lupínkovým grafitem	GJL	87 – 144
s červíkovým grafitem	GJV	145 – 160
s kuličkovým grafitem	GJS	165 – 175

Poměrně rozsáhlý soubor experimentů a zkoušení odlitků ultrazvukem dovolil zpracovat výsledky v grafickém vyjádření funkčních vztahů, z nichž některé jsou uvedeny v číselné podobě. Např. kontrola kuličkového grafitu se provádí podle vztahu 9, který je pro každou slévárnu odlišný. Podíl červíkovitého grafitu se vypočte dle vztahu 10. Pokud množství GVI (kuličkový grafit) je > 80% a množství GIII (červíkový grafit) je max. 80%, odlitek vyhovuje a prochází kontrolou. [1]

$$GVI = 1132 \frac{L}{L_u} - 1000 [\%] \quad (9)$$

$$GIII = 775 - 0,142c_L \quad (10)$$

3. MAGNETICKÁ STRUKTUROSKOPIE

3.1 Základní pojmy magnetizmu

3.1.1 Magnetická indukce B [T]

Magnetická indukce je vektorová veličina, která charakterizuje magnetické pole. Jednotkou je tesla T, která se číselně rovná síle $F = 1\text{ N}$, a ta působí na jednotku délky přímého vodice protékaného proudem $I = 1\text{ A}$ a orientovaného kolmo ke směru B . Magnetická indukce také udává hustotu magnetického toku na jednotku plochy $S = 1\text{ m}^2$. Platí:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (11)$$

3.1.2 Magnetický indukční tok Φ [Wb]

Tok vektoru magnetické indukce B , určitou plochou. Jednotkou je weber [Wb]. Matematické vyjádření:

$$d\vec{\Phi} = \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (12)$$

3.1.3 Intenzita magnetického pole H [A/m]

Je vektorová veličina, která charakterizuje magnetické pole jako zdroj. Definiční vztah:

$$H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0} \quad (13)$$

3.1.4 Magnetizace M [A/m]

Představuje vektor, který charakterizuje na základě teorie dipólů fyzikálně intenzitu pole uvnitř tělesa vyvolanou magnetickými vlastnostmi a je definován vztahem:

$$M = \frac{1}{\mu_0} \cdot B - H \quad (14)$$

3.1.5 Permeabilita prostředí μ [-]

Charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí, v němž existuje magnetické pole a je rovna součinu permeability vakua μ_0 a relativní permeability μ_r . Rozhoduje o tom, do jakých skupin řadíme látku (Diamagnetické $\mu < 1$, paramagnetické $\mu > 1$, feromagnetické $\mu \gg 1$). Platí vztah:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (15)$$

3.1.6 Polarizace J [T]

Jedná se o vektor, který podobně jako magnetizace vyjadřuje změnu pole vyvolanou magnetickými vlastnostmi látek. Umístíme-li feromagnetický objekt do oblasti extrémního magnetického pole o indukci $B_e = \mu_0 \cdot H$, způsobí toto pole v objektu magnetizaci M a indukci B_m . Výsledné pole musí mít indukci:

$$B = B_e + B_m = B_e + J \quad (16)$$

Neboli magnetická indukce B_m vzniká v důsledku polarizace J feromagnetického materiálu. Polarizace v tělese je způsobena orientací elementárních magnetů (domén), vytvořených pohybem elektrických nábojů uvnitř molekuly. Platí:

$$J = B - \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot M = (\mu - 1) \cdot \mu_0 \cdot H \quad (17)$$

3.1.7 Magnetická susceptibilita κ [-]

Je bezrozměrný koeficient úměrnosti mezi magnetickou polarizací J a indukcí B_e neboli:

$$J = \kappa \cdot B_e \quad (18)$$

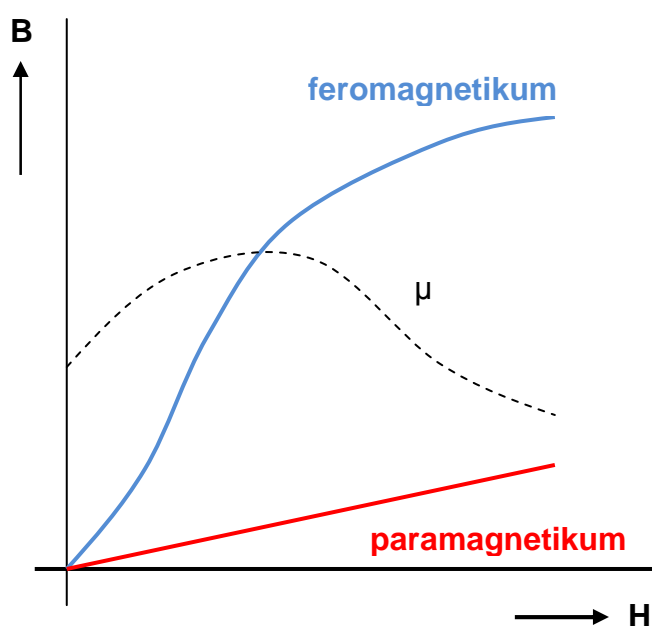
3.1.8 Magnetizování feromagnetických materiálů

U feromagnetických látek lze vyvolat již slabým vnějším magnetickým polem takové uspořádání atomů, při kterém dochází k zesílení magnetického pole. Krystaly těchto látek jsou totiž tvořeny malými zmagnetovanými oblastmi, které nazýváme magnetické domény. Rozhraní, která jednotlivé domény od sebe oddělují, se nazývají „Blochovy stěny“. V každé magnetické doméně je souhlasná orientace magnetických momentů sousedních atomů. Protože je však orientace jednotlivých domén různá, chová se feromagnetikum, které předtím ještě nebylo magnetizováno, zdánlivě nemagneticky. Začne-li na takový materiál působit postupně narůstající magnetické pole, začnou se zvětšovat domény orientované ve směru vnějšího pole na úkor ostatních. Současně však také dochází k postupné změně orientace magnetických dipólů ostatních domén do směru vnějšího pole. Po jejich souhlasném uspořádání doménová struktura vymizí a látka je magneticky nasycena. Taková látka si ponechá své magnetické vlastnosti i po odeznění vnějšího magnetického pole a stává se z ní permanentní magnet.

Feromagnetismus se projevuje jen tehdy, je-li materiál v krystalickém stavu. Ve stavu kapalném, nebo plynném se tyto látky chovají jako paramagnetické.

Další výraznou vlastností je, že po zahřátí na tzv. curieho teplotu ztrácí látka své feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou.

Zatímco je závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole u diamagnetických i paramagnetických materiálů lineární, u feromagnetik tomu tak není, jak ukazuje *obrázek 5*. Magnetizace těchto materiálů nezávisí jen na intenzitě magnetického pole, ale i na historii. Tento jev, kdy jsou podstatné i stavy, kterými látka prošla předtím, označujeme jako hystereze. Z výše uvedeného vyplývá, že magnetizační křivky feromagnetických materiálů nemají stejný průběh při zesilování a zeslabování vnějšího magnetického pole. [4]



Obrázek 5 – Křivky prvotní magnetizace paramagnetického a feromagnetického materiálu

3.2 Aplikace magnetizmu

Aplikací magnetizmu v defektoskopii jsou zkoušky, které jsou založeny na magnetické a elektrické indukci a používají se pro zjišťování povrchových vad polotovarů a výrobků nebo vad uložených těsně pod povrchem. Základní metody těchto zkoušek jsou níže stručně popsány.

3.2.1.1 Metoda rozptylových toků

K indikaci vad se využívá změn magnetického toku, vyvolaných vadami ve zkoušeném předmětu, který je za tímto účelem zmagnetován. Vady zvyšují podstatně magnetický odpor, takže v místě vady dochází ke zhuštění a zakřivení magnetických siločar, z nichž část vystupuje na povrch a vytvoří na obvodu vady magnetické póly. Ke zviditelnění vad se používá buď suchého feromagnetického prášku, nebo detekční kapaliny, ve které je prášek rozptýlen. Podmínkou výrazné indikace povrchových vad je zmagnetování zkoušeného předmětu tak, aby ve zkoušené oblasti vznikl magnetický tok vhodně orientovaný k průběhu vady.

3.2.1.2 Metoda vířivých proudů

Tato metoda dokáže zkoumat vlastnosti, u kterých jejich změna ovlivňuje buď elektrickou vodivost, průřez nebo permeabilitu zkoušeného materiálu.

Princip je takový, že na zkoušený předmět se nechá působit střídavé magnetické pole cívky, které v něm indukuje střídavé napětí. Protože kovový předmět představuje uzavřený proudový vodič, vznikají v něm cirkulární proudy, nazývané vířivé. Tyto proudy svými magnetickými účinky působí zpětně na pole původní, tj. budící. Vlivem vířivých proudů je budící pole zeslabováno, takže vzniká výsledné pole dané vektorovým složením obou polí dílčích (budícího pole a pole vířivých proudů). Vlastní vyhodnocení se děje prostřednictvím napětí, které je výsledným polem indukováno (přímo v cívce, která budí magnetické pole nebo v druhé cívce měřící).

Pozn.: Vady zhoršují vodivost, což se projeví zpětně změnou napětí. Metoda se používá především pro měření vodivosti povrchových vrstev.

3.2.2 Zjišťování mechanických vlastností materiálu

Současná tvrdá konkurence ve výrobě a zpracování polotvarů (výkovky, odlitky, plechy) vedená přísnými požadavky převážně zahraničních zákazníků (úzké tolerance mechanických vlastností a nezřídka požadavky 100% kontroly) vyžadují aplikace spolehlivých a vysoce produktivních metod nedestruktivní strukturoskopie. Kromě metody vířivých proudů se průmyslově využívají impulzní magnetické metody. [5] Tato metoda má několik výhod oproti metodě vířivých proudů. Mezi hlavní přednosti impulzního magnetování před střídavým a stejnosměrným je získání velmi vysokých hodnot intenzity magnetického pole H_r bez tepelných efektů v sondě. Dále bezkontaktní působení bez vlivu velikosti oddálení snímače od povrchu výrobku, napětí a chemické složení na výsledky měření.

Charakteristikou feromagnetických ocelí a litin jsou bloky stejně orientovaných atomů, tzv. domény, které tvoří subzrna krystalické struktury. Polarizaci vnějším magnetickým polem dochází u domén se shodnou a blízkou polarizací s vnějším polem k růstu posunem Blochových zón, nebo ke skokovým změnám polarizace Barkhausenovými přeskoky. Po zániku vnějšího magnetického pole H_0 se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace I_r . Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r (jako M). Vratným změnám brání atomy vázané v molekulách, atomární pnutí, mřížkové poruchy (dislokace) a překážky (atomy uhlíku, cementitu a martenzitu). Proto složky, které obsahují karbidy, martenzit, dislokace a hranice zrn vykazují vysokou hodnotu I_r . Demagnetizační činitel N charakterizuje vnější i vnitřní geometrické poměry rozhraní feromagnetika. Extrémní hodnoty N vymezují geometrické podmínky metody magnetického bodového pólu. [5]

Platí vztah:

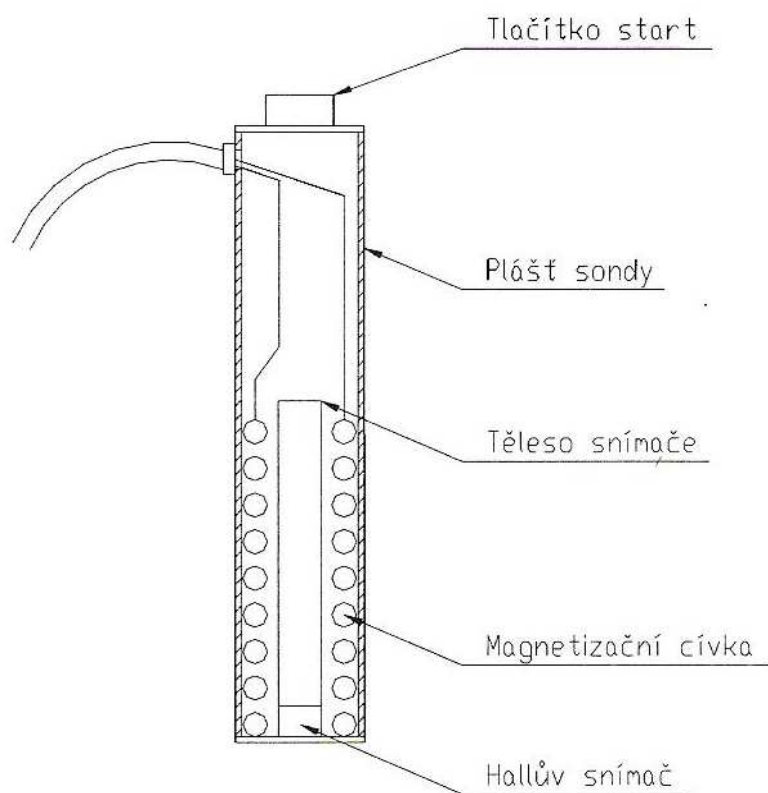
$$H_r = H_0 - \frac{N \cdot I_r}{\mu} \quad (19)$$

3.2.2.1 Měření magnetickým bodovým pólem

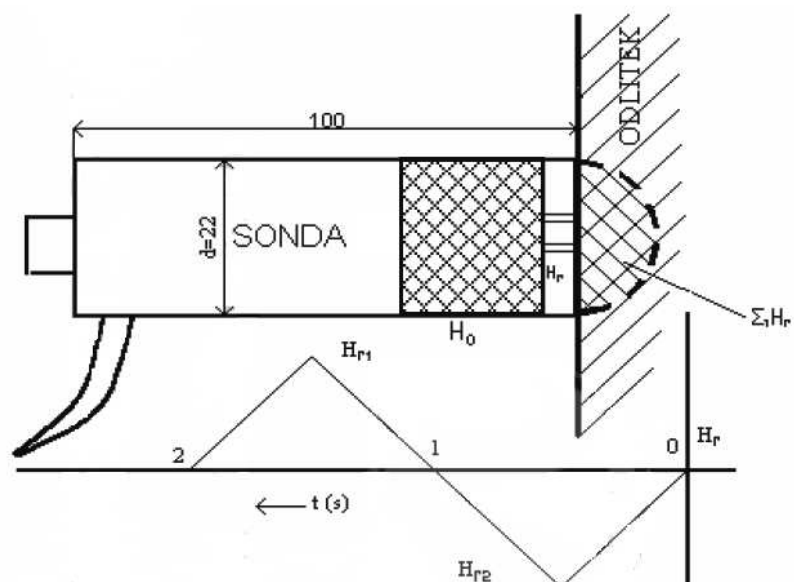
Jak jsem se již zmínil v předchozím odstavci, feromagnetické látky si udrží své magnetické vlastnosti v důsledku existence poruch krystalové mřížky (dislokací) a dalších překážek jako jsou atomy uhlíku, cementitu, nebo martenzitu, které brání návratu domén do původní orientace a do celkově magneticky neutrálního stavu.

Princip magnetické metody bodového pólu spočívá v tom, že je měřena intenzita magnetického pole těsně po předchozím zmagnetizování feromagnetického materiálu pod příložnou sondou měřicího přístroje (DOMENA). Velikost změřené intenzity magnetického pole souvisí se strukturou měřeného materiálu, a proto můžeme s určitou přesností měřit na feromagnetických materiálech tvrdost, ale dále také pevnost a hloubku prokalení. Souvislost mezi mechanickou a magnetickou tvrdostí materiálu je dána přítomností magneticky tvrdých strukturních složek (např. lamel perlitického cementitu, martenzitu), které jsou zároveň i mechanicky tvrdé.

Při měření metodou magnetického bodového pólu se nejprve zmagnetizuje povrch zkoušeného materiálu příložnou sondou (viz *obrázek 6, 7*), jejíž magnetizační cívka je napájena trojúhelníkovitými impulsy opačné polarity. Hallův snímač, který je umístěn v ose cívky na povrchu čela sondy, změří intenzitu zbytkového pole po předposledním impulsu, který je kladný. Následuje poslední záporný impuls, po jehož ukončení se opět změří intenzita zbytkového pole. Absolutní součet kladné a záporné intenzity zbytkového pole se ukáže na displeji měřicího přístroje. Tímto způsobem se dosáhne reprodukovatelných hodnot zmagnetování měřeného místa a eliminuje se nepříznivý vliv rušivých magnetických polí. [6]



Obrázek 6 – Schéma příložené sondy

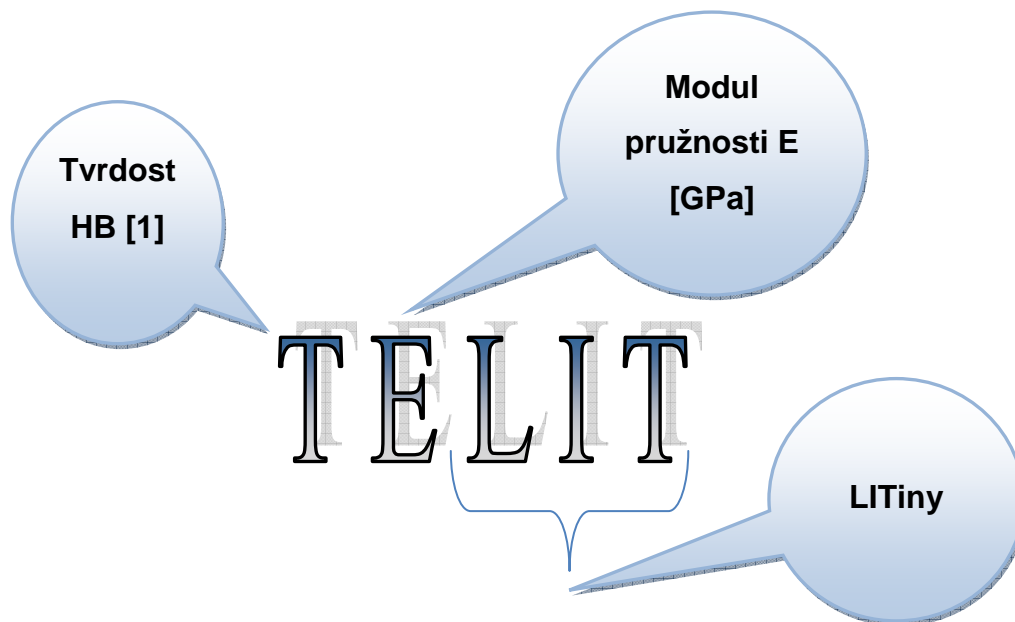


Obrázek 7 – Princip měření

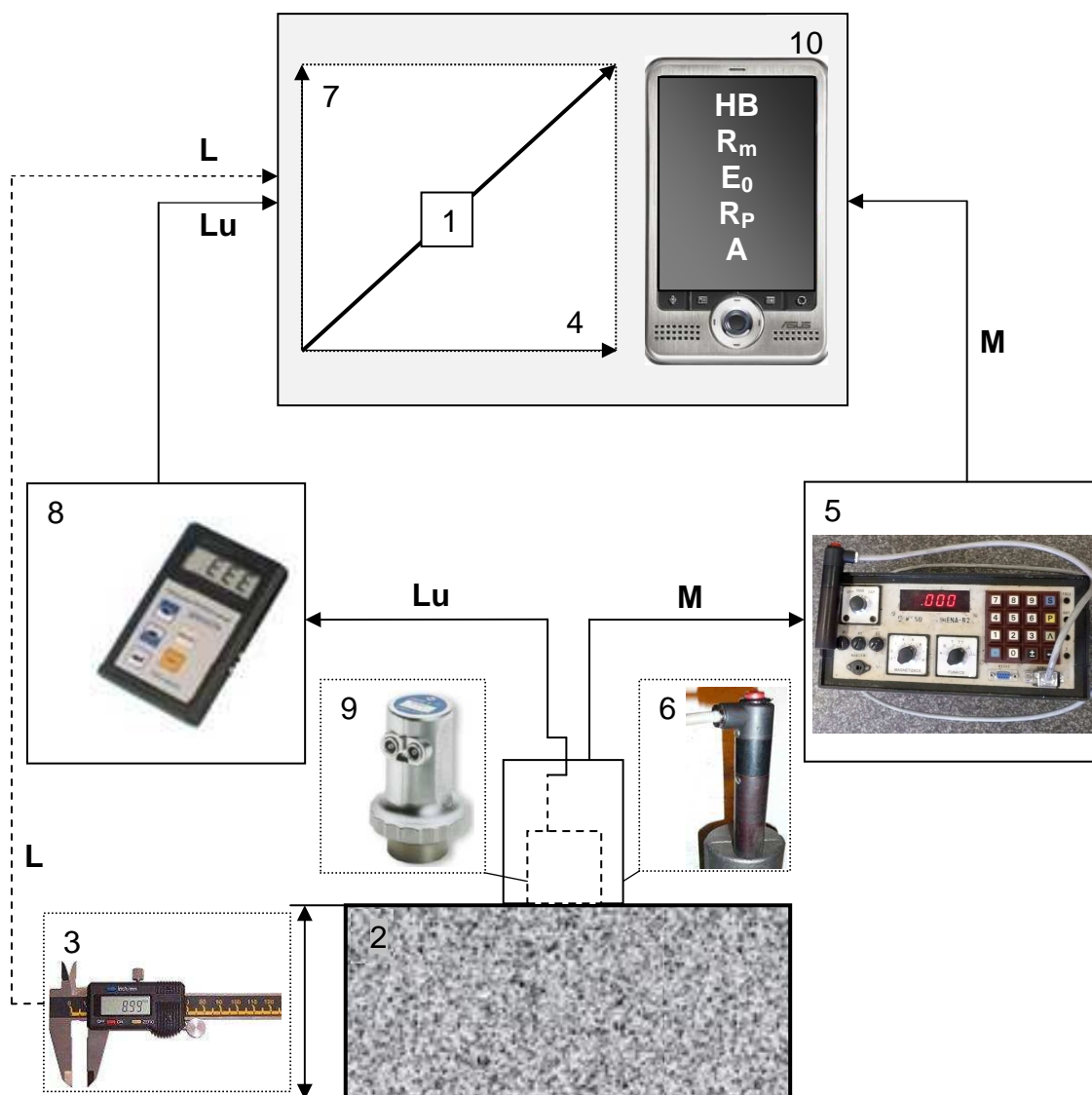
4. KOMBINOVANÝ STRUKTUROSKOP TELIT

V současnosti chybí jedno-úkonová nedestruktivní metoda pro popis matrice (aplikace magnetické strukturoskopie) a zároveň grafitu (aplikace ultrazvukové strukturoskopie) u odlitků z grafitických litin. Doposud jsou používány pouze destruktivní statistické metody, které nedovedou postihnout sto procent výrobní produkce. Z těchto důvodů se vyvíjí zařízení pod názvem TELIT, které kombinuje ultrazvukovou a magnetickou metodu nedestruktivní strukturoskopie. Tedy mezi jeho nejhlavnější části patří ultrazvukový tloušťkoměr, magnetický tvrdoměr DOMENA (viz schéma, *obrázek 9*) a digitální posuvné měřidlo Mitutoyo.

Tento kombinovaný strukturoskop slouží k nedestruktivnímu stanovení mechanických vlastností = kvality materiálu (tvrdost HB [1], pevnost v tahu R_m [MPa], modul pružnosti E_0 [GPa], tažnost A [%], mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] a také umožňuje stanovit podíl kuličkového grafitu v litině) a tím ulehčuje získávání parametrů potřebných ke spolehlivému zjišťování tvaru a množství disperze (grafitu) v litinách. Tento přístroj je výsledkem vývoje v rámci projektu F1 - 1M/01 BONATRANS, MPO a byl mu přidělen užitný vzor CZ17380.



Obrázek 8 – Proč název TELIT?



Obrázek 9 – Schéma kombinovaného strukturoskopu TELIT

- Legenda:
- 1 - vektor struktury
 - 2 - měřený vzorek
 - 3 - tloušťka vzorku
 - 4 - tuhost litiny
 - 5 - impulzní magnetický tvrdoměr (DOMENA)
 - 6 - magnetický snímač (Hallova sonda)
 - 7 - složka (tvrdost) matrice litiny
 - 8 - ultrazvukový tloušťkoměr
 - 9 - ultrazvuková sonda
 - 10 - sdružovací jednotka (PDA)

Pomocí TELITu měříme tyto vstupní veličiny:

- ▶ pomocí magnetického tvrdoměru DOMENA – remanentní (zbytkový) magnetizmus M [A/m]
- ▶ pomocí posuvného měřítka - skutečnou tloušťku měřené součásti L [mm]
- ▶ pomocí ultrazvukového tloušťkoměru – akustickou dráhu L_u [mm]

Matematické modely charakterizující výstupní měřené veličiny:

$$HB = A \cdot M + B \quad (20)$$

$$E_0 = \left(K \cdot \frac{L}{L_u}\right)^2 \quad (21)$$

$$R_m(R_p, A) = C \cdot \left(\frac{L}{L_u}\right)^D \cdot HB^E \quad (22)$$

Konstanty A , B , C , D , E se stanoví experimentálně pomocí logaritmické metody regresní analýzy a slouží pro správné zkalibrování přístroje při daném měření. Což zaručuje vysokou přesnost (v mezi tolerance) a reprodukovatelnost měření.



Obrázek 10 – Zařízení TELIT

4.1 Magnetický tvrdoměr DOMENA

V současné době se k měření metodou magnetického bodového pólu používá přístrojů řady DOMENA, které navazují na sérii přístrojů REMAG. Díky neustálému vývoji této metody můžeme přístroji DOMENA měřit nejen tvrdost feromagnetických materiálů, ale i pevnost a hloubku prokalení. Ve srovnání s klasickými způsoby měření tvrdosti je tato metoda velmi rychlá a je možné změřit tvrdost materiálu i přes povrchovou vrstvu. [6]

Matematickým modelem, s kterým tento přístroj měří přímo hodnotu tvrdosti, je vztah 20. Magnetický tvrdoměr DOMENA je součástí vyvinutého zařízení TELIT (viz obrázek 10, 11).



Obrázek 11 – Přední panel přístroje TELIT

- Legenda:
- 1 - Hlavní vypínač
 - 2 - PDA, kapesní počítač
 - 3 - Ultrazvukový tloušťkoměr (DIO 570 od firmy Starmans)
 - 4 - Magnetický tvrdoměr
 - 5 - Konektory pro připojení snímačů
 - 6 - USB disk pro ukládání a přenos dat

4.2 Školní zařízení SYLIT

Zařízení SYLIT je starším typem přístroje TELIT a nyní slouží pro školní využití. Autor tohoto laboratorního zařízení je Ing. Richard Ryšavý. Pracuje na stejném principu s tím rozdílem, že místo PDA obsahuje starší notebook HP „HALIKAN“ s procesorem 386 a ultrazvukový tloušťkoměr F02 2MHz ČVUT. (viz obrázek 12).



Obrázek 12 – Zařízení SYLIT, vpravo ukázka připojení hlavních součástí zařízení TELIT

5. ZÁKLADY REGRESNÍ ANALÝZY

Regresní analýza je označení statistických metod, pomocí nichž odhadujeme hodnotu jisté náhodné veličiny (tzv. závisle proměnné, cílové proměnné, regresandu anebo vysvětlované proměnné) na základě znalosti jiných veličin (nezávisle proměnných, regresorů, kovariát anebo vysvětlujících proměnných). Rovnice (funkce), popisující typ závislosti mezi proměnnými, se nazývá regresní rovnice (funkce). Podle toho, o jaký druh závislosti se jedná, mluvíme o lineární, logaritmické, kvadratické, exponenciální atd., rovnici (funkci).

Naším cílem je najít vzorec (rovnici) pro výpočet jedné proměnné na základě druhé. Musíme si však uvědomit, že tyto rovnice nejsou určeny

jednoznačně, ale jsou zatíženy několika chybami. Přitom s těmito chybami úzce souvisí kvalita a vhodnost či nevhodnost rovnice.

V regresní funkci předpokládáme, že nezávisle proměnná X nabývá hodnot X_1, X_2, \dots, X_n a závisle proměnná Y nabývá odpovídajících hodnot Y_1, Y_2, \dots, Y_n (kde n je počet pozorování). Snažím se nalézt, jak určit z hodnoty nezávisle proměnné X hodnotu závisle proměnné Y . [7]

5.1 Výpočet spojnic trendu – Rovnice

Metodou nejmenších čtverců vypočteme křivku, která bude proložena body podle následujících rovnic.

5.1.1 Lineární

$$y = m \cdot x + b \quad (23)$$

kde m charakterizuje směrnici a b je průsečík s osou Y .

5.1.2 Logaritmická

$$y = c \cdot \ln x + b \quad (24)$$

Kde c a b jsou konstanty.

5.1.3 Exponenciální

$$y = c \cdot e^{b \cdot x} \quad (25)$$

Kde c a b jsou konstanty a e je základ přirozeného logaritmu.

5.1.4 Mocninná

$$y = c \cdot x^b \quad (26)$$

5.2 Korelace

Analytický nástroj korelace měří vztah mezi dvěma sadami dat, která jsou vážena, aby nebyla závislá na použité jednotce míry. Na základě následujících vzorců vrátí výpočet korelačního koeficientu souboru kovarianci dvou sad dat dělenou součinem jejich směrodatných odchylek.

Korelaci můžeme použít k testování závislosti dvou sad dat. Závislost znamená, že vysoké hodnoty v jedné sadě odpovídají vysokým hodnotám v druhé sadě (kladná korelace) nebo že nízké hodnoty v jedné sadě odpovídají vysokým hodnotám ve druhé sadě (záporná korelace). Pokud jsou hodnoty v obou sadách nezávislé, bude korelace blízká nule. [7]

Rovnice korelačního koeficientu je:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (27)$$

$$-1 \leq \rho_{x,y} \leq 1 \quad (28)$$

$$\text{cov}(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y)] \quad (29)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \quad (30)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2 \quad (31)$$

Kde: μ – střední hodnota
 σ – střední směrodatná odchylka
 cov – kovariance
 ρ – korelační koeficient
 n – počet hodnot
 X, Y – sady dat

[7]

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro splnění cíle této diplomové práce byla důležitá vhodná volba zkoumaných vzorků. Jelikož slévárny FERAMO Brno a FEREX Liberec mají zájem zavést do své technologie zařízení TELIT, daly k dispozici sadu vzorků imitujících tenké stěny odlitků z grafitické litiny s lupínkovým grafitem JL (u grafitu kuličkového JS byla již parametrizace vytvořena v rámci projektu BONATRANS a disertační práce Ing. J. Dočekala, Ph.D.). Další sada vzorků byla vytvořena na půdě technické univerzity v Liberci. Jedná se o litinové vzorky s kuličkovým grafitem série JS. Tyto vzorky sloužily spíše pro získání informací o negativních vlivech na měřené veličiny.

Jelikož každá slévárna má odlišný metalurgický proces výroby litinových odlitků, který ovlivňuje vlastní parametrizaci, bude mít v konečném řešení každá svůj vlastní matematický model pro nedestruktivní stanovení pevnosti.

Vzorky ze slévárny **FERAMO Brno** jsou tenké desky (viz *obrázek 13*) údajně tří taveb (podle tříd jakosti ČSN 422415, 422420 a 422425). U každé třídy jakosti jsou vždy tři vzorky po tloušťkách 4, 7 a 12 mm imitující tenké stěny odlitků.

Litina těchto vzorků byla tavena v horkovětrné kupolové peci s odprášením a odlévání tekutého kovu do forem se zajišťovalo prostřednictvím odlévacích automatů. Formovací kapacity tvoří automatické bezrámové formovací linky (viz www.feramo.cz).

V *tabulce 7* je zobrazeno chemické složení těchto taveb. K dispozici byly také tři štíhlé tyče této slévárny (dle taveb), z kterých se později vypočetla konstanta K a naměřily se na nich mechanické a fyzikální vlastnosti (HB , R_m , M , Lu). Tyto vzorky budou později rozděleny na dvě poloviny za účelem porovnání měřených hodnot mezi žíhanými a nežíhanými vzorky.

Tabulka 7 – Chemické složení vzorků slévárny FERAMO Brno

Označení tavby	Údajná třída jakosti dle ČSN	Chemické složení [%]							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	S _c
A345	422415	3,55	2,22	0,43	0,12	0,054	0,05	0,05	1,027
A027	422420	3,35	2,21	0,43	0,11	0,050	0,07	0,05	0,968
A338	422425	3,29	1,93	0,62	0,09	0,068	0,06	0,20	0,927

S_c...stupeň eutektičnosti (pro GJL platí rozmezí od 0,75 – 1,1)



Obrázek 13 – Vzorky slévárny FERAMO Brno (celkem 27)

Vzorky slévárny **FEREX Liberec** jsou odlitky typu delších desek o tloušťkách 5 – 20 mm (3 tavby - posloupnost po 5 mm, celkem 12 vzorků, viz *obrázek 14*) opět imitující tenké stěny odlitků (chemické složení viz *tabulka 8*).

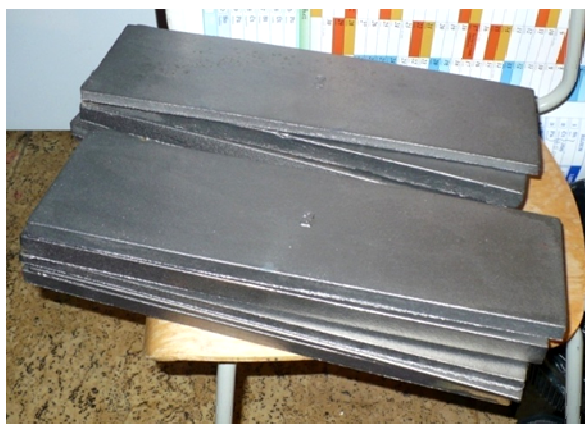
Slévárna FEREX Liberec využívá duplexní systém tavení, kde základním tavícím zařízením je bezvyzdívková horkovětrná kuplovna. Natavená litina je dále transportována do elektrické udržovací pece k homogenizaci teploty a chemického složení. Základním výrobním zařízením je horizontální licí linka s impulsním formováním do rámců.

Na těchto vzorkách bude také vhodné sledovat vliv průtočnosti litiny formou v oblasti vtoku a konce na měřené veličiny.

Série vzorků slévárny **TU Liberec** jsou jednotlivě odlévány a jejich chemické složení je zobrazeno v *tabulce 9*. Pro přípravu taveniny těchto vzorků byla použita elektrická indukční středofrekvenční kelímková pec na max. 20 kg tekutého kovu. Formovací bentonitová směs v rámech byla ručně upěchovaná.

Tabulka 8 – Chemické složení vzorků slévárny FEREX Liberec

Označení ní tavby	Chemické složení [%]							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	3,56	0,62	2,02	0,14	0,11	0,06	0	0,04
2	3,25	0,54	1,75	0,137	0,12	0,13	0	0,29
3	3,28	0,76	2,00	0,17	0,12	0,08	0,23	0,39

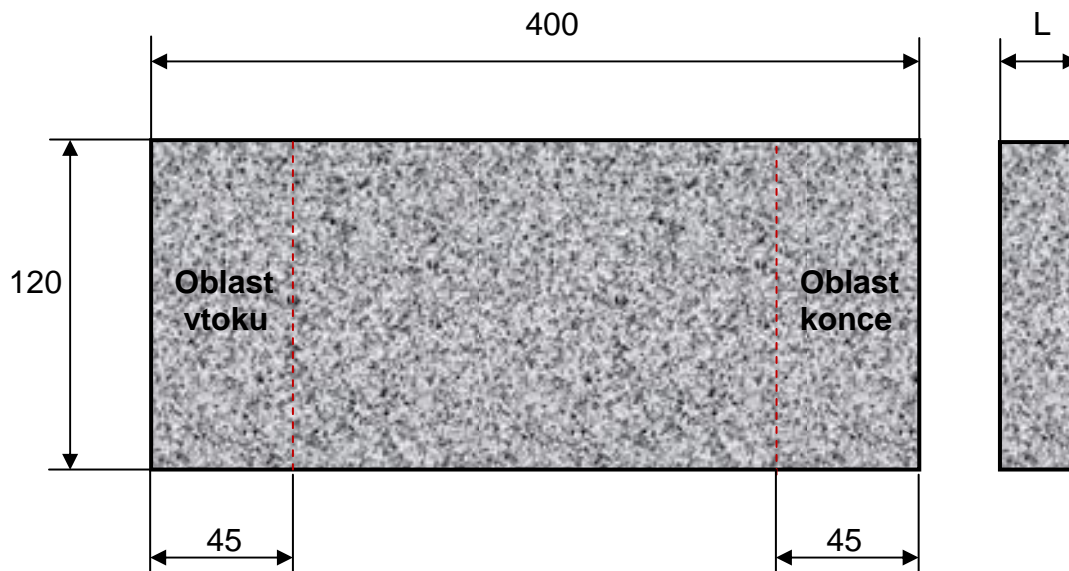


Obrázek 14 – Vzorky slévárny FEREX Liberec, vcelku

Tabulka 9 - Chemické složení vzorků slévárny TU Liberec, vybrané prvky

Označení tavby	Chemické složení [%]							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
JSV	3,42	0,036	2,71	0,023	0,006	0,016	0,006	0,01
JS17	3,42	0,002	3,85	0,024	0,006	0,022	0,007	0,008
JS18	2,97	0,224	3,53	0,027	0,005	0,014	0,013	0,011
JS19	3,38	0,181	3,89	0,025	0,009	0,011	0,010	0,035
JS20	3,35	0,25	3,70	0,026	0,008	0,016	0,010	0,022
JS21	3,33	0,144	3,48	0,026	0,008	0,014	0,009	0,079

Výpočet průtočnosti litiny deskou FEREX jsem zjišťoval prostým měřením jejich hmotností. Velikost průtočnosti se totiž těmito deskami mění, a proto se bude moci zjišťovat, jaký vliv má na měřené hodnoty (oblast vtoku a konce). Průtočnost se rovná objemovému množství taveniny.



L...tloušťka, která byla měřena digitální posuvkou

----- místa řezu; vytvoření dvou pásů, na kterých se provede tahová zkouška ke zjištění pevnosti R_m

Tabulka 10 – Orientační hmotnost desek FEREX Liberec

Tavba	L [mm]	Hmotnost m [kg]
1	4,95	1,65
	10,5	3,455
	15,24	5,12
	20,32	6,865
2	5,08	1,55
	9,82	3,36
	15,02	4,995
	20,18	6,775
3	4,86	1,68
	10,56	3,615
	15,84	5,38
	20,88	7,06

6.1 Měření zbytkového magnetizmu M

Měření zbytkového magnetizmu M, neboli měření intenzity normálové složky magnetického zbytkového pole, se uskutečňovalo na magnetickém tvrdoměru DOMENA - B3. Před vlastním měřením bylo nutné přístroj kalibrovat pomocí etalonu o známé hodnotě zbytkového magnetizmu M_0 (200). Prováděla se vždy dvě měření označena jako M1 a M2, protože jednotlivá měření se u ocelí a litin hodnotně liší. Druhé měření více vypovídá o struktuře měřeného materiálu a je zatíženo menší chybou (podle výzkumu Ing. R. Ryšavého). Po každé stejné sérii měření se provedlo překalibrování přístroje na hodnotu M_0 . Je důležité se zmínit, že stupeň magnetizace byl nastaven na optimální hodnotu čtyři (z praxe). Všechny naměřené hodnoty zbytkového magnetizmu M jsou k dispozici v *příloze A*.

6.1.1 Vzorky slévárny FERAMO Brno

Způsob měření je zobrazen na *obrázku 15*. Nejprve jsem měřil hodnotu M přibližně na středu každého vzorku, ale při pozdějším zjištění chemické nehomogenity (místa kde litina ztuhla bíle), byla další měření provedena na stranách jednotlivých vzorků tak (označeno K – konec, Stř – střed a Z – vtok, viz *příloha 1*), aby se mohla provést diskuze vlivu struktury na hodnotu magnetizace.

Dalším faktem, který může ovlivňovat hodnotu M, je i vnitřní pnutí vzniklé po ztuhnutí těchto desek, a tak se tato měření opakovala po žíhání k odstranění tohoto pnutí (parametry žíhání: 540°C, 1.5h, elektrická pec) a to po rozřezání všech desek FERAMO označených b. Ty se podélně rozřezaly (viz *obrázek 16*) za účelem zhotovení vzorků pro tahovou zkoušku, kde polovina vzorků se nechala vyžíhat a druhá polovina se nechala ve stavu po odlití (měření označeno M3, M4 viz *přílohy 2, 3*).



Obrázek 15 – Způsob měření zbytkového magnetizmu M – Desky před rozřezáním



Obrázek 16 – Nařezané vzorky slévárny FERAMO (vlevo žíhané)

6.1.2 Vzorky slévárny FEREX Liberec

Na těchto vzorcích jsem provedl (ještě před rozřezáním) dvě měření (viz *obrázek 17*), a to vždy na straně vtoku (3 - Z) a konce (1 - K), abych se mohl přesvědčit, do jaké míry se projeví vliv struktury na hodnotu zbytkového magnetizmu M . V *příloze 4* jsou hodnoty M ještě před rozřezáním těchto desek, kdežto v *příloze 5* jsou naměřené hodnoty magnetizace již po rozřezání (měřeno vždy na přední straně P a na obrácené O). Vše měřeno na licím, otryskaném povrchu.



Obrázek 17 – Způsob měření zbytkové magnetizace M na vzorkách slévárny FEREX Liberec, před rozřezáním

6.2 Měření tvrdosti

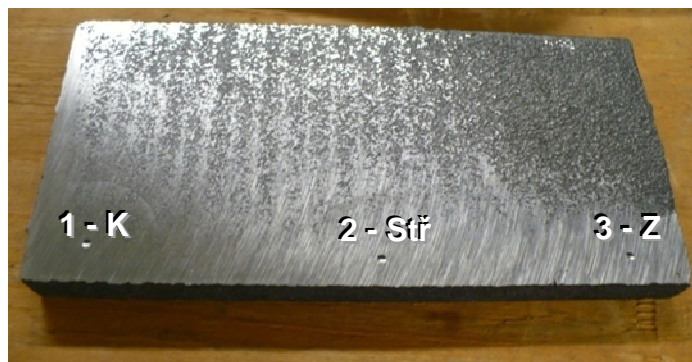
Destruktivní měření tvrdosti jsem prováděl podle zkoušky Brinella HB (5/750/15) na tvrdoměru ve zkušebně materiálů TU (viz *obrázek 18*). Před vlastním měřením jsem provedl odstranění licího povrchu broušením.



Obrázek 18 – Používaný tvrdoměr

6.2.1 Vzorky slévárny FERAMO Brno

Na každém měřeném vzorku jsem provedl tři vpichy směrem od konce (1 - K) ke vtoku (3 - Z), viz *obrázek 19*. Měření jsem nemohl provádět v ose desek, jelikož bych ovlivnil část vzorku určenou pro tahovou zkoušku.



Obrázek 19 – Místa měření tvrdosti na vzorcích slévárny FERAMO

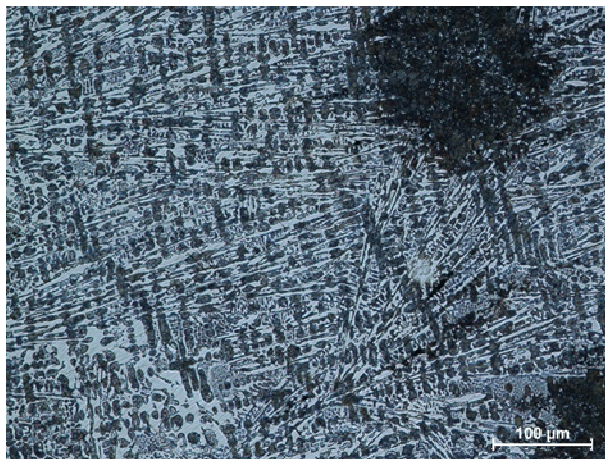
Tabulka 11 – Naměřené hodnoty tvrdosti HB na jednotlivých vzorcích slévárny FERAMO

Označení tavby	Tvrdost HB (5/750/15)			Tloušťka/označení
	1 - K	2 - Stř	3 - Z	
A345	415	378	241	4/a
	409	415	275	4/b
	231	222	224	7/a
	224	222	226	7/b
	215	209	202	12/a
	204	200	202	12/b
A027	278	266	263	4/a
	266	257	250	4/b
	249	236	244	7/a
	241	200	239	7/b
	215	207	209	12/a
	214	207	200	12/b
A338	438	444	438	4/a
	438	514	444	4/b
	306	350	306	7/a
	306	325	313	7/b
	252	244	255	12/a
	255	246	241	12/b

Jelikož u většiny vzorků vycházely hodnoty tvrdosti větší, než odpovídá její maximální hodnota pro danou jakost litiny GJL, provedl jsem na vybraných vzorcích označených **žlutým polem** strukturní mikroanalýzu.

6.2.1.1 Strukturní mikroanalýza

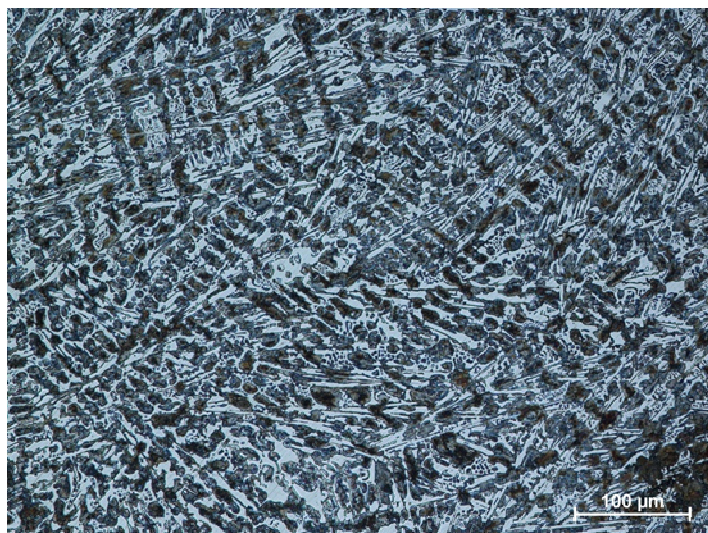
Strukturní mikroanalýzu jsem provedl na vzorcích 15(4), 25(4) a 25(7). Metalografický výbrusy jsou vždy z každého rohu (okolí vpichu 1 a 3). Většinou byly výbrusy zvětšeny 200x, přechodový perlit 1000x. Vše leptáno nitalem 3 - 5%.



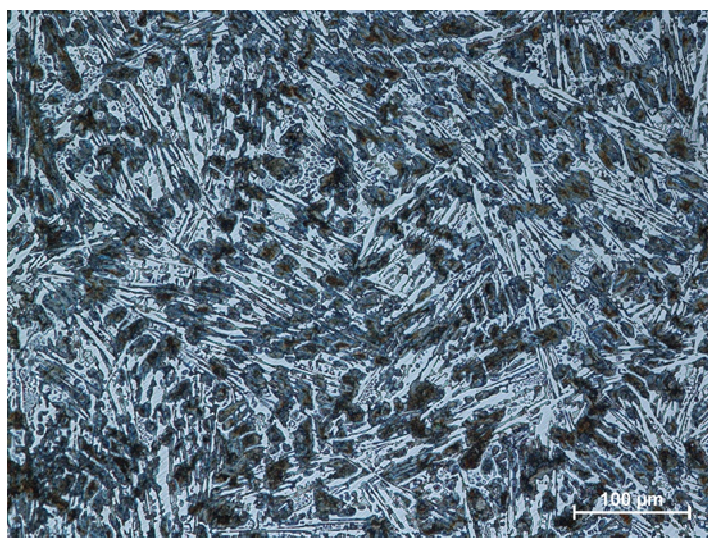
Obrázek 20 – Vzorek 15(4), roh 1



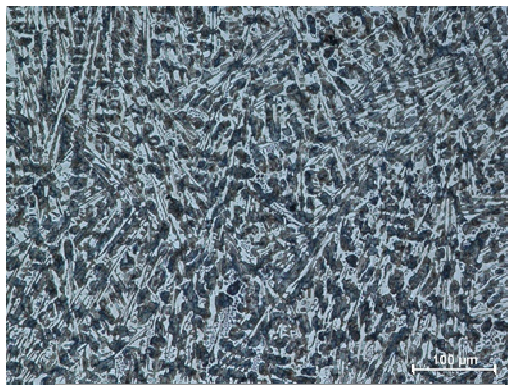
Obrázek 21 – Vzorek 15(4), roh 3



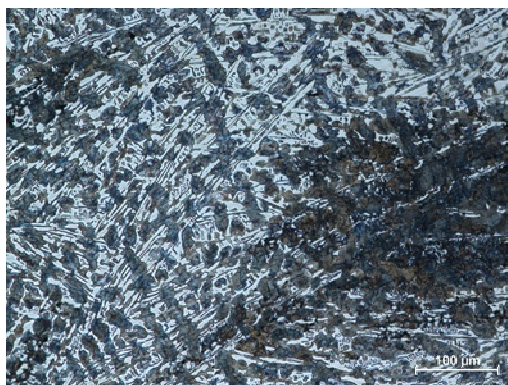
Obrázek 22 – Vzorek 25(4), roh 1



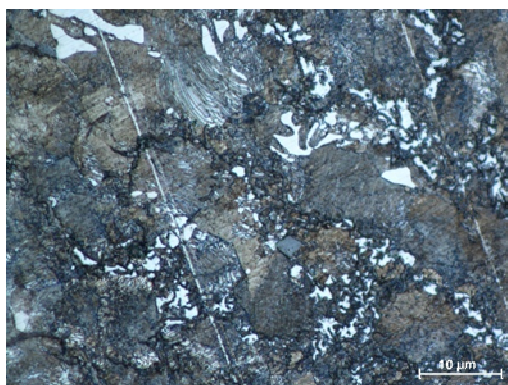
Obrázek 23 – Vzorek 25(4), roh 3



Obrázek 24 – Vzorek 25(7), roh 1



Obrázek 25 – Vzorek 25(7), roh 3



Obrázek 26 – Vzorek 25(7), roh 3, přechodový perlit – zvětšeno 1000x

6.2.2 Vzorky slévárny FEREX Liberec

Před měřením tvrdosti jsem z těchto vzorků zhotovil dva proužky pomocí pásové pily (viz *obrázek 27*). Jeden z oblasti vtoku 3 - Z (začátek) a druhý z konce 1 - K. Každý řez jsem ochlazoval emulzí, aby nedošlo k ovlivnění struktury.



Obrázek 27 – Pásová pila



Obrázek 28 – Nařezané desky slévárny FEREX

Na vzorkách FEREX jsem provedl jeden vpich, a to na každém odřezaném pásu, abych posoudil vliv průběhu tuhnutí na velikost tvrdosti HB. Poté jsem měření opakoval na straně řezu každého vzorku (viz *tabulka 12*, vpravo).

Tabulka 12 – Naměřené hodnoty tvrdostí vzorků slévárny FEREX

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Tvrdost HB (5/750/15)		Tvrdost HB (2,5/187,5/15)	
		3 - Z	1 - K	3 - Z	1 - K
1	5	217	241	219	227
	10	217	229	195	215
	15	200	229	195	202
	20	222	217	211	207
2	5	266	252	257	260
	10	272	263	244	239
	15	252	246	234	239
	20	224	255	207	224
3	5	269	269	255	255
	10	249	252	239	244
	15	255	269	234	239
	20	241	252	229	234

6.3 Měření akustické dráhy L_u , výpočet rychlosti

ultrazvukových vln c_L

Měření rychlosti ultrazvukových vln se neprovádí přímo, ale pomocí ultrazvukového tloušťkoměru se změří dráha ultrazvukových vln L_u , digitálním posuvným měřidlem skutečná tloušťka L a poté se ze vztahu 7 daná rychlost c_L vypočte.

Pro zopakování vztah: $c_L = c_{LO} \cdot \frac{L}{L_u} = 5920 \cdot \frac{L}{L_u}$

(c_{LO} ...rychlost šíření ultrazvukových vln v oceli)

Použité zařízení:



- Ultrazvukový tloušťkoměr DIO 570 od firmy Starmans, součástí laboratorního zařízení SYLIT



- Ultrazvukový defektoskop DIO 562 od téže firmy



- digitální posuvné měřidlo, součástí laboratorního zařízení SYLIT

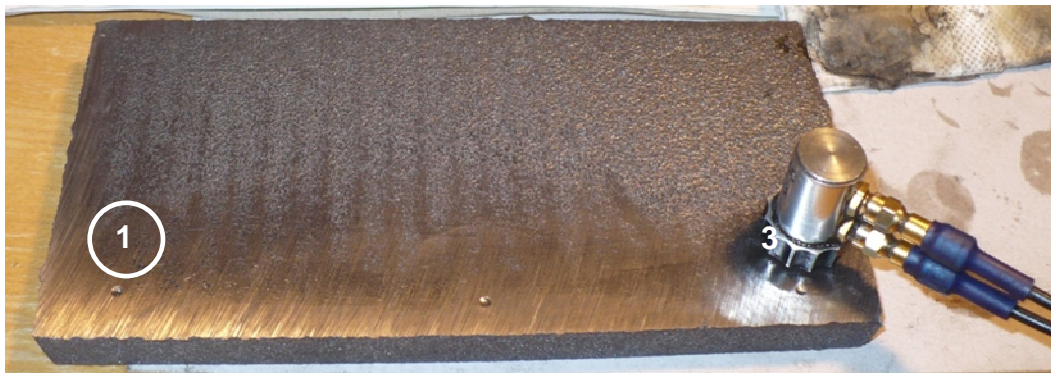
- kontaktní kapalina (Karldeutsch)

- ultrazvukové sondy: PQ2/10-4C a PQ2/10-2C

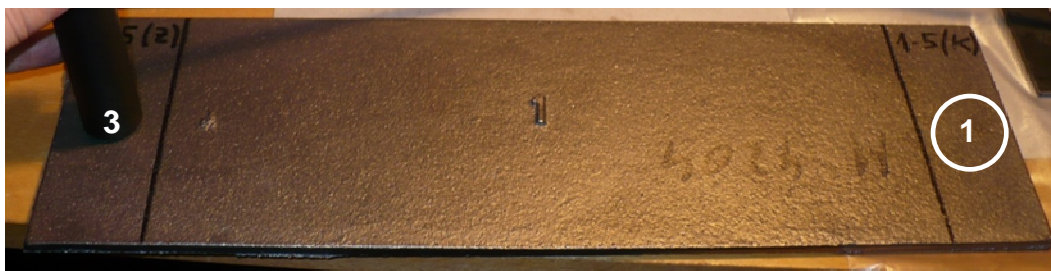
Abych posoudil vliv struktury (byla zjištěna nehomogenita způsobená rozdílnou rychlostí tuhnutí na různých místech vzorků) na hodnotu rychlosti ultrazvukových vln, měřím na všech vzorkách FERAMO před rozřezáním dvakrát, a to v okolí vtoku 3 a konce 1 (viz *obrázek 29*, využil jsem zbroušeného povrchu po měření tvrdosti). Další měření hodnot L_u proběhla po rozřezání těchto vzorků. Jak jsem se již zmínil v odstavci 6.1.1, kde se polovina vzorků nechala vyžít a druhá polovina zůstala v litém stavu. To proto, aby se zjistil případný vliv vnitřního pnutí na velikost akustické dráhy L_u . A tak v *přílohách 7 a 8* jsou nová měření na vzorkách bez a s TZ. Aby se mohl pozorovat pouze vliv kvality a drsnosti povrchu (bez vlivu V-efektu, tloušťek stěn, atd.), provedla se do třetice měření přes rozměr 10 mm na již obrobených vzorkách pro zkoušku tahem. Ta samá měření se provedla i na

vzorkách slévárny FEREX (způsob měření viz *obrázek 30*, oblast vtoku 3, oblast konce 1), jen bez vlivu tepelného zpracování.

Všechny naměřené hodnoty akustické dráhy L_u jsou v *příloze A*. Vypočtené hodnoty c_L jsou v *příloze B*.



Obrázek 29 – Způsob měření akustické dráhy L_u na vzorkách slévárny FERAMO



Obrázek 30 – Způsob měření akustické dráhy L_u na vzorkách slévárny FEREX

Kalibrace přístrojů proběhla na etalonu o známé tloušťce L . Tloušťkoměr DIO 570 byl nastaven na citlivost 58,8 (přes licí povrch) a rychlost ultrazvukových vln pro ocel ($c_{L0} = 5960$ m/s). Sonda byla u přístroje DIO 570 používána PQ2/10-2C (2MHz). Na již odřezaných vzorkách před a po TZ, měření přes 10 mm, se použil defektoskop DIO 562 se sondou PQ2/10-4C (4MHz).

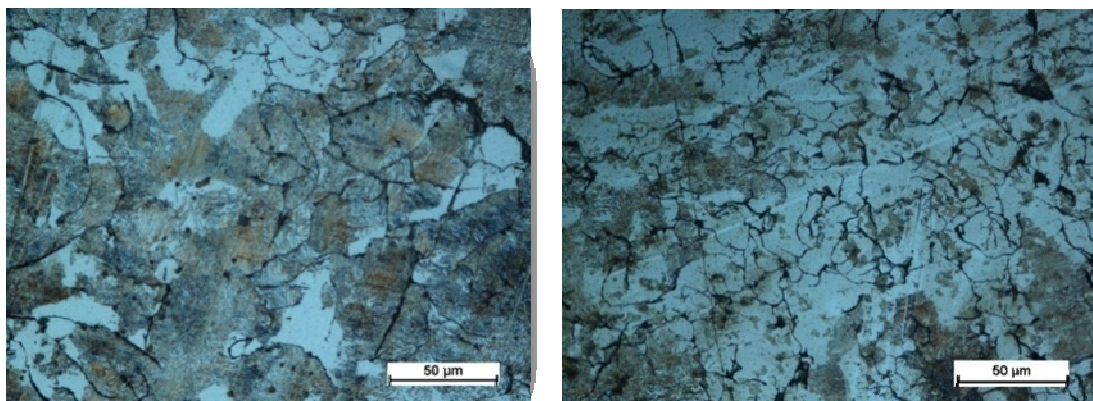
Je nutné se ještě zmínit, že měření výstupních veličin jako je L , L_u a M se prováděla na laboratorním zařízení SYLIT, jelikož vlastníkem

kombinovaného strukturoskopu TELIT je slévárna SKS Krnov a.s. O SYLITU více na str. 34.

Tabulka 13 – Naměřené a vypočtené hodnoty tyčí FERAMO a FEREX

FERAMO								
Nežiháno	HB [-]	Průměr d [cm]	DIO 562 [cm]		E_0 [GPa]	K [kN ^{1/2} /m]	M [A/m]	
Tavba			L_0	L_u			M1	M2
A338	212	2,886	20,03	25,05	154	490,5	225	213
A027	176	2,955	20,04	26,4	140	492,9	164	156
A345	156	2,886	19,98	28,03	123	491,3	162	154
Žiháno	HB [-]	Průměr d [cm]	DIO 562 [cm]		E_0 [GPa]	K [kN ^{1/2} /m]	M [A/m]	
Tavba			L_0	L_u			M1	M2
A338	217	2,886	20,03	25,07	154	490,3	219	209
A027	179	2,963	20,04	26,37	141	494,9	183	162
A345	155	2,883	19,98	28,42	119	492,6	166	148
FEREX								
Tavba	HB [-]	R_m [MPa]	K [kN ^{1/2} /m]		d [mm]			
1	179	220,9	437,8		30			
2	229	300,4						
3	217	300,1						

Hodnoty konstant K u tyčí slévárny FERAMO se jeví jako velice extrémní (kolem 490 MPa), a proto jsem provedl analýzu struktury a zhotovil jsem tak výbrusy. Žádná anomálie struktury zjištěna nebyla - lupínkový grafit s feriticko perlitickou matricí, určitá nehomogenita poměru mezi perlitem, feritem a velikostí grafitu. Jelikož na hodnotu K má vliv způsob výroby těchto tyčí, je pravděpodobné, že její extrémní velikost je tímto způsobena.



Obrázek 31 - Ukázka struktury tyčí FERAMO, vlevo tavba A027 oblast středu, vpravo tavba A345 oblast kraje



Obrázek 32 – Modely desek FERAMO, vlevo štíhlá tyč pro výpočet konstanty K

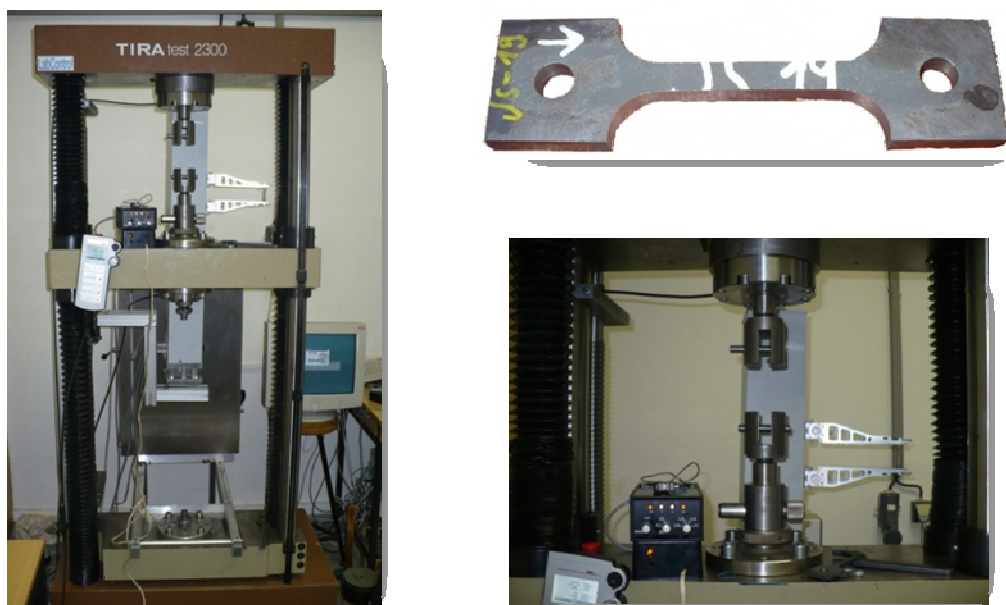
6.4 Naměřené a vypočtené hodnoty mechanických vlastností (E_0 , R_m , R_p , ...) u zkoumaných vzorků

Výpočet počátečního modulu pružnosti E_0 jsem realizoval podle vztahu 8. Konstanta K se vypočetla ze štíhlých tyčí jednotlivých taveb (obrázek 32, vypočtené hodnoty pro vzorky slévárny FERAMO viz *tabulka 13.*). Pro vzorky slévárny FEREX se používala již známá hodnota $K = 437,8 \text{ kN}^{1/2}/\text{m}$. Naměřené hodnoty meze pevnosti R_m a meze kluzu R_p zkoumaných vzorků jsou v *přílohách C*.

Pro zopakování vztah:

$$E_0 = \left(K \cdot \frac{L}{L_u} \right)^2$$

Destruktivní stanovení meze pevnosti pro všechny již obrobené vzorky se prováděla na trhacím stroji TIRAtest 2300 s přispěním Ing. Solfronka, Ph.D. z katedry strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů. Pro záznam a snímání průběhu trhací zkoušky byl použit laserový extenzometr.



Obrázek 33 – Používaný trhací stroj (vlevo) s použitím extenzometru + úchopné hlavy (obrázek vpravo dole), obrobené zkušební ploché vzorky (vpravo nahoře)

7. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Znovu opakuji, že hlavním úkolem této práce je docílit co nejvěrohodnějších konstant a získat tím zvýšení koeficientu korelace, s kterým bude, prostřednictvím matematického modelu pevnosti R_m , kombinovaný strukturoskop TELIT měřit. Proto je důležité, aby měření probíhalo na vzorkách o více jakostí a tloušťkách. Tedy, aby výsledný model charakterizoval širší oblast možností měření na odlitcích z grafitických litin.

Na hodnotu korelace matematického modelu může mít vliv jak způsob samotného měření, tak i metalurgický proces výroby, který je spojen se strukturními vlastnostmi konkrétního měřeného odlitku.

Jak vidíme na *obrázku 34*, v matematickém modelu pro stanovení pevnosti R_m , jehož konstanty C, D, E a A, B vzorce HB se vkládají do přístroje TELIT, jsou zastoupeny dva členy. Na výslednou hodnotu korelace má tedy vliv jak měření pomocí ultrazvuku, tak současně i měření zbytkového magnetizmu. Při získávání těchto hodnot dochází k řadě problémů. Cílem této práce je pozdvihnout tyto problémy, popřípadě je dokázat eliminovat.

První člen se týká ultrazvuku, přesněji šíření ultrazvukových vln v materiálu. Hodnota tohoto členu (poměru), se zjistí pomocí ultrazvukového tloušťkoměru (Lu) a digitálního posuvného měřidla (L).

$$R_m = C \cdot \left(\frac{L}{Lu} \right)^D \cdot (HB)^E$$

Obrázek 34 – Matematický model pro výpočet meze pevnosti v tahu R_m

Druhým členem je hodnota „magnetické“ tvrdosti HB, která je stanovena ze vztahu 20, tedy pomocí měřené zbytkové magnetizace M. Jeho hodnotu získáme pomocí přístroje DOMENA B3 po vložení konstant A, B.

Litiny jsou tvořeny ocelovou maticí. V ní je vyloučen grafit, který nabývá různých tvarů podle cílené metalurgické technologie. Víme, že pevnost litin není určena pouze maticí, ale že její velikost závisí hlavně na tvaru a velikosti (kompaktnosti) vyloučeného grafitu. Proto, pro nedestruktivní stanovení meze pevnosti R_m oblastí litinových odlitků, je nutné spojit magnetickou a ultrazvukovou metodu. Pomocí magnetické metody bodového pólu totiž stanovujeme tvrdost, která charakterizuje matici litinových odlitků (**druhý člen**). Kdežto ultrazvuková metoda nám umožňuje získání poznatků o tvaru a velikosti vyloučeného grafitu (**první člen**).

Tzn., že např. u ocelí by stačilo ke kontrole pevnosti nedestruktivně měřit pouze tvrdost. Samotná hodnota tvrdosti u litin však napoví pro výslednou hodnotu R_m málo a k tomu se ještě hodnoty tvrdostí u jednoho typu litiny pro konkrétní jakostní skupiny silně překrývají. Z toho vycházíme u matematického modelu pro pevnost, a tudíž musíme současně měřit tvar, množství a velikost grafitu v litině.

Nejčastějším problémem litinových odlitků bývá jejich strukturní a chemická nehomogenita, vnitřní pnutí, vady nespojitosti a také kvalita a drsnost povrchu. Všechna tato hlediska mají menší až velice výrazný vliv na akustické a magnetické vlastnosti měřených odlitků z grafitických litin, tedy ve výsledku na hodnotu nedestruktivně stanovené pevnosti R_m . Což nakonec i ovlivňuje výši koeficientu korelace parametrizovaného modelu.

7.1 Člen první, hodnota L/L_u

Hodnota poměru L/L_u nám charakterizuje akustické vlastnosti měřených vzorků. Podle její velikosti snadno zjistíme rychlost šíření ultrazvukových vln ve vzorkách (viz vztah 7) a také počáteční modul pružnosti E_0 (měřený bez zatížení, viz vztah 8). Jak jsem se již výše zmínil, akustické vlastnosti dobře korelují s morfologií grafitu litiny, tedy s jeho tvarem a velikostí. Tzn., že pomocí ultrazvuku můžeme kontrolovat stav, kvalitu litinových odlitků, viz má bakalářská práce [1].

Na hodnotu akustické dráhy L_u , tedy poměru L/L_u , má vliv mnoho faktorů. A jelikož jeho velikost má významný vliv v matematickém modelu pro R_m , je nutné stanovit co nejlepší podmínky pro získání její skutečné nezkreslené hodnoty.



Obrázek 35 – Matematická závislost akustické dráhy L_u na hodnotu pevnosti R_m podle modelu

Ke zkresleným hodnotám akustické dráhy L_u , tedy k nepřesnému měření (stanovení R_m) může dojít v několika případech:

Těmito problémy jsem se již zabýval ve své bakalářské práci, kde jsou podrobněji popsány.

- ◆ Pro získání hodnoty akustické dráhy L_u budeme používat ultrazvukový tloušťkoměr DIO 570, který je součástí zařízení TELIT. Je nutná jeho správná kalibrace spojená s nastavením citlivosti, předsádky a rychlosti šíření ultrazvuku.
- ◆ Důležitá je také správná volba sondy. Při měření tenkých stěn je nepřesnost měření, s použitím dvojítych sond, spojena s V-efektem, který souvisí s průměrem měniče sondy (nutno používat u tenkých stěn menší průměry). A u silnějších stěn s útlumem, který souvisí s frekvencí použité sondy (frekvence je přímo úměrná útlumu materiálu).
- ◆ Dalším a podstatným vlivem na nepřesnost měření je drsnost a kvalita povrchu, která velice ovlivňuje navázání akustické vazby. V našem případě se jedná o povrch litinových odlitků. Víme, že odlitky mívají obvykle drsný, nerovný v lepším případě otryskaný povrch. Tzn., že musíme nanést více kontaktní kapaliny, ve které je 4x větší útlum ultrazvukových vln, a to má za následek naměření větší hodnoty L_u oproti skutečné.

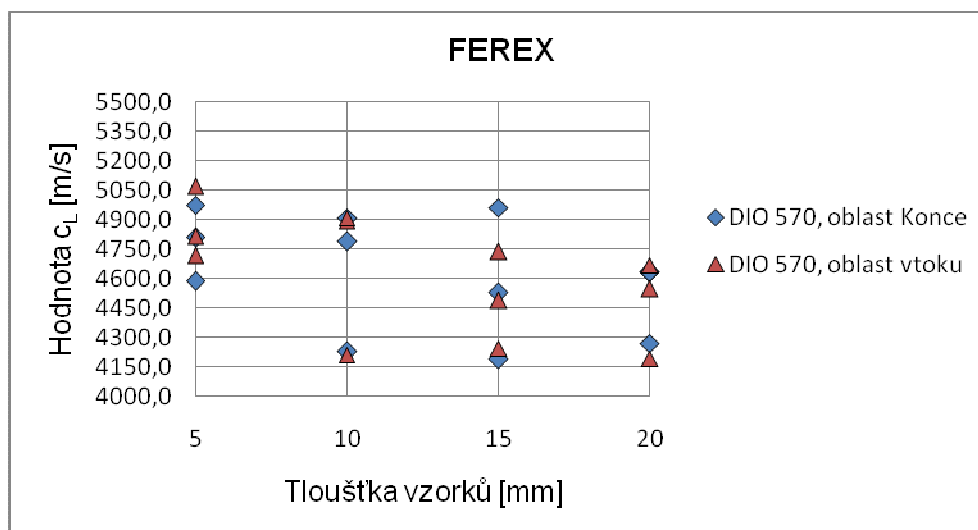
- ♦ Vliv na hodnotu L_u má také struktura měřeného odlitku. U odlitků, které jsou strukturně nehomogenní vyloučeným grafitem, se hodnota L_u v závislosti na místech měření může velice měnit. Víme už, že akustická dráha L_u je závislá na labyrintu grafitických útvarů. Neboli z nekompaktností grafitu její hodnota silně roste. Pokud tedy dochází v rychleji ochlazované části odlitku k metastabilní krystalizaci eutektika, tedy že uhlík na místo vyloučení jako grafit se váže na železo ve formě cementitu a vylučuje se jako tvrdý ledeburit, existuje v šíření akustické vlny méně překážek a tudíž hodnota rychlosti zvuku s rostoucím množstvím ledeburitu ve struktuře roste. To vše bylo hlavním důvodem, proč jsem se ve svých experimentech snažil porovnávat naměřené hodnoty v oblasti vtoku, středu a konce vzorků.

U zkoumaných vzorků jsem akustické vlastnosti měřil celkem třikrát, přesněji jejich akustickou dráhu L_u . Hodnota poměru L/L_u je v tabulkách charakterizována velikostí rychlosti šíření ultrazvuku c_L . Poprvé před rozřezáním vzorků, podruhé po rozřezání a žihání (pouze u vzorků FERAMO, abych mohl posoudit vliv vnitřního pnutí na tuto hodnotu) a po třetí na již zhotovených vzorkách pro trhačku (všechny hodnoty v *příloze A*). Třetí měření se prováděla hlavně z důvodu eliminace a porovnání hodnot nepříznivých vlivů, jako kvalita povrchu a jeho drsnost, nerovnost, V-efektu a tloušťky vzorků, na všech vzorkách se totiž měřilo přes stejnou obroubenou tloušťku $10 \pm 0,1$ mm (viz *obrázek 36*).

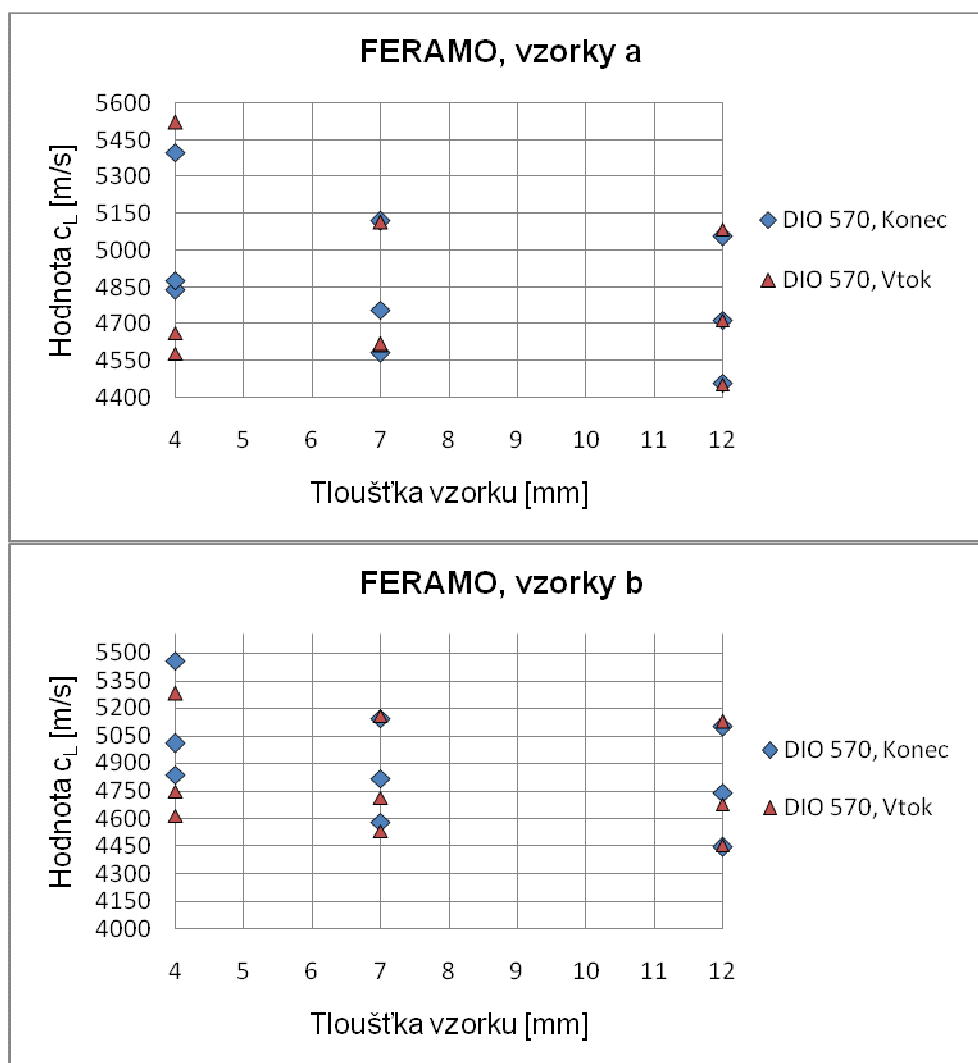
První měření se prováděla hlavně proto, aby se zjistil vliv místa měření (struktury), tavby a tloušťky vzorků imitujících stěny odlitků na hodnotu poměru L/L_u . Jak se můžeme přesvědčit v následujících grafech, hodnota poměru charakterizována rychlostí ultrazvuku c_L se v závislosti na výše zmíněných hledisek mění. Např. v *grafech 1,2* můžeme pozorovat pokles hodnot c_L v závislosti na rostoucí tloušťce. To proto, že s rostoucí tloušťkou musí ultrazvukové vlny procházet větší hmotou materiálu a to znamená narůstání hodnoty L_u vlivem útlumu. Jako hlavním vlivem této závislosti však

bude rychlost ochlazování, která se s rostoucí tloušťkou snižuje a to má za následek rozdílné velikosti, jemnosti grafitu. Jehož velikost má v tomto případě největší vliv na hodnotu akustické dráhy L_u (rychlosti c_L).

Obvyklé hodnoty rychlostí podélných ultrazvukových vln c_L v litinách jsou dány rozmezím 3500-5600 m/s, z čehož hodnota roste s vyšší kompaktností grafitu. Ve vzorkách obou sléváren (FERAMO a FEREX) je grafit tvaru lupínku, tedy nízká kompaktnost. Tzn., že hodnoty c_L by se měly zhruba pohybovat, podle tříd jakostí měřených vzorků, mezi 4200 až 4820 m/s (FEREX) a 4060 až 4620 m/s (FERAMO). Hodnoty jsem vypočetl zpětně z tabulkové hodnoty E_0 (viz tabulka 5, hodnoty získány z tyčí o průměru 30 mm). Z grafů však vidíme, že ve skutečnosti jsou v některých případech hodnoty c_L vyšší řádově o 200 až 800 m/s. Jelikož místa měření byla oblast vtoku a konce, což jsou místa, která tuhnou nejrychleji, byla metalograficky dokázána metastabilní eutektická krystalizace. Tato krystalizace se logicky nejvíce projevila u nejtenčích vzorků, které tuhnou nejrychleji, takže je u nich pravděpodobnost vzniku ledeburitu nejvyšší. Již jsem se zmiňoval, že strukturní složka jakou je ledeburit, znamená snížení překážek, které musí ultrazvukové vlny překonávat. Tedy nárůst hodnoty c_L (poměru L/L_u). Na grafech si můžeme všimnout i toho, že oblast konce vykazuje nepatrně vyšší hodnoty c_L oproti oblasti vtoku (konec tuhnul rychleji) a že tento efekt se s rostoucí tloušťkou snižuje (FERAMO, $t = 12$ mm, hodnoty c_L mezi oblastmi konce a vtoku mají daleko menší rozptyl). To znamená, že s rostoucí tloušťkou je rovnoměrnější pokles teploty v celém objemu vzorku během tuhnutí a tedy je ve výsledku homogennější struktura.

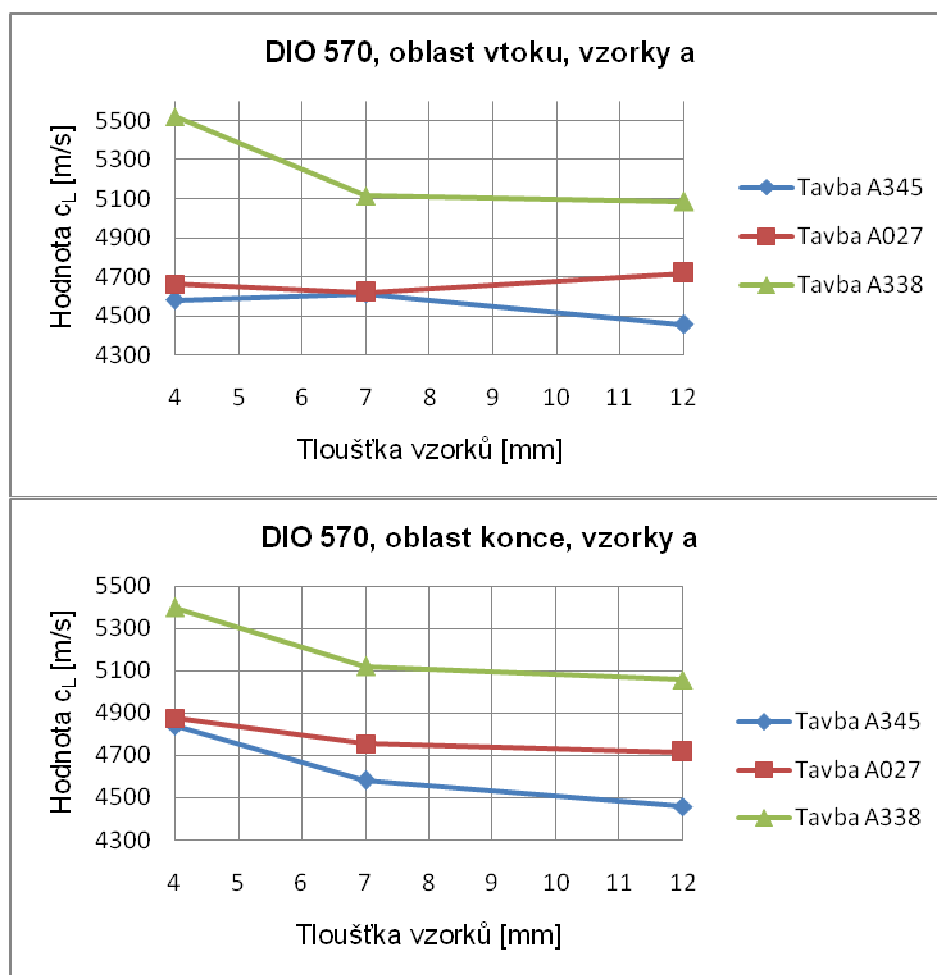


Graf 1 - Porovnání hodnot c_L měřených v oblasti vtoku a konce v závislosti na tloušťce vzorků FEREX

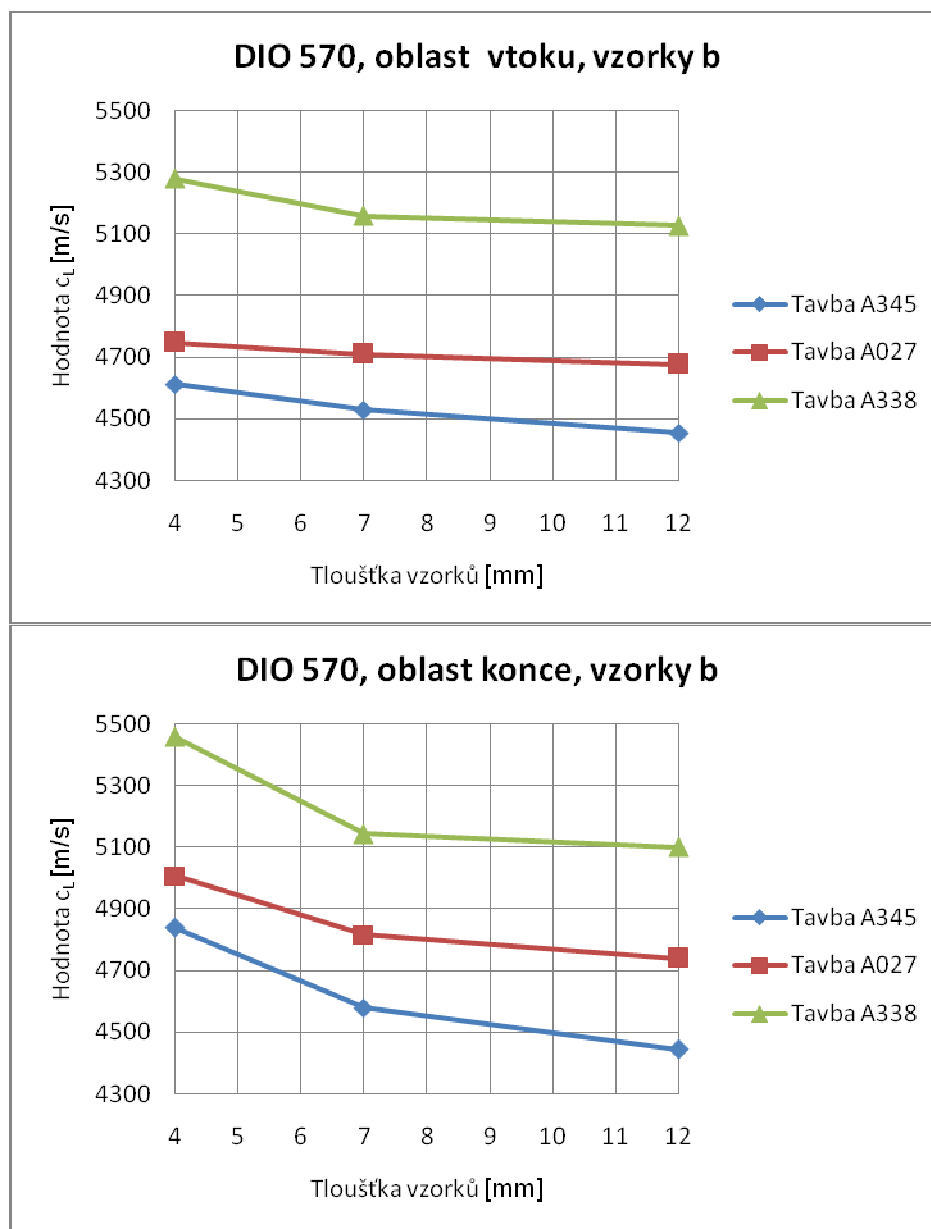


Grafy 2 - Porovnání hodnot c_L měřených v oblasti vtoku a konce v závislosti na tloušťce vzorků FERAMO

Na dalších *grafech 3 až 5* lze lépe pozorovat vliv tloušťky a hlavně třídy jakosti GJL na hodnotu c_L . Pod tavbou A338 se skrývá nejvyšší měřená třída jakosti GJL u vzorků slévárny FERAMO, a to jakost 422425. Hodnoty c_L této tavby jsou nejvyšší u všech měřených tloušťek, protože ve struktuře je obsažen nejjemnější grafit. Naopak u tavby A345, která má z hlediska měřených vzorků slévárny FERAMO nejnižší jakost, tedy hrubý grafit, jsou hodnoty c_L nejnižší. Víme už přeci, že podle velikosti c_L můžeme zjišťovat tvar a velikost grafitu (i když lépe podle E_0). Opět se můžeme přesvědčit o tom, že u nejtenčích vzorků obou sléváren, kde by se měl projevovat V-efekt, tudíž by měly být hodnoty c_L nízké (zvětšení L_u oproti skutečné), jsou naopak vlivem rychlého ztuhnutí a vzniku ledeburitické struktury nejvyšší. Tavby A027 a A338 jsou z hlediska tvaru a velikosti grafitu sobě blízké.



Grafy 3 – Vliv tloušťky a třídy jakosti GJL vzorků a FERAMO na hodnotu c_L v oblasti vtoku a konce



Grafy 4 - Vliv tloušťky a třídy jakosti GJL vzorků *b* FERAMO na hodnotu c_L v oblasti vtoku a konce

U vzorků slévárny FERAMO byly ještě k dispozici tři štíhlé tyče dle tříd jakostí, které sloužily pro výpočet konstanty K vztahu 8. Pomocí vypočtených počátečních modulů pružnosti E_0 , které díky extrémní hodnotě K jsou neadekvátní ke zkoumaným vzorkům typu desek a tyčí této slévárny, můžeme porovnat vliv struktury mezi těmito typy (viz *tabulka 14*). Struktura je totiž u tyčí odlišná tím, že je daleko homogennější (rovnoměrný průběh tuhnutí v celé tyči) než u desek a metalurgicky byla i dokázána stabilní eutektická krystalizace. Z tabulky je patrný rozdíl hodnot E_0 , který v průměru činí 24 GPa.

Tento rozdíl vznikl vlivem tvaru měřeného odlitku, jenž ovlivňuje jeho způsob tuhnutí, resp. jeho výslednou strukturu.

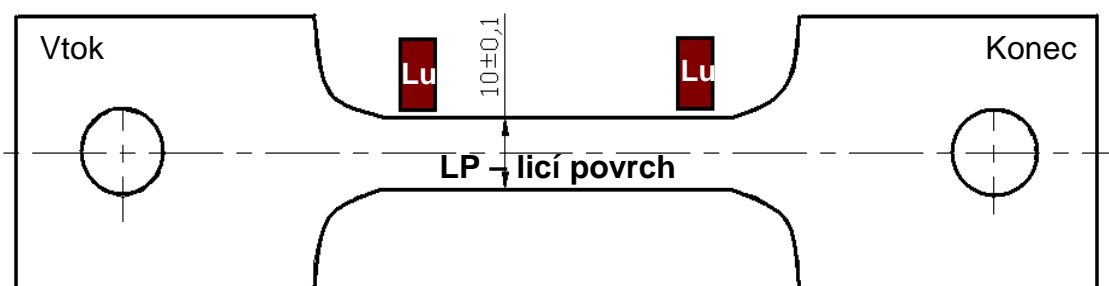
Tabulka 14 – Porovnání hodnot E_0 u vzorků typu desek a tyčí

Označení taveb FERAMO	Třídy jakosti dle ČSN	Průměrné hodnoty E_0 [GPa]	
		Desky	Štíhlé tyče
A345	422415	144,9	122,7
A027	422420	155,9	140,0
A338	422425	187,6	153,8

Aby se eliminovaly všechny již zmíněné faktory, které mohou ovlivnit měření akustické dráhy L_u , změnila se nakonec tato hodnota ještě po obroubení všech vzorků před tahovou zkouškou. Vždy se měřilo přes rozměr 10 mm (viz *obrázek 36*). Takže nepříznivé vlivy jako V-efekt u slabších stěn, útlum ultrazvuku u stěn silnějších, kvalita a nerovnost povrchu, se tím to vyloučily. Hodnoty L_u (c_L) pak závisejí pouze na struktuře, třídě jakosti upraveného vzorku. Jak se po obroubení změnily hodnoty rychlostí ultrazvuku c_L , vzorků FERAMO je zobrazeno v *tabulce 15* a v *grafu 5*, který zachycuje rozdíl hodnot c_L měřených na licím, a poté obrobeném povrchu vzorků FERAMO o tloušťkách 4 a 7 mm. Nehledíme tentokrát na velikosti hodnot c_L , které ovlivňuje především různost struktur, ale na jejich rozdíl při měření na odlišných površích. Tento rozdíl je znatelný. Jak kvalita povrchu může ovlivnit výpočet E_0 je zachyceno v *tabulce 15*. U vzorků slévárny FEREX se všechny hodnoty c_L kromě všech taveb o tloušťce 5 mm a 10 mm taveb 2 zvětšily v průměru o 200 m/s. U nejtenčích se hodnota nezvětšila, protože při měření na litém ještě neobrobeném povrchu, se hodnota měřila v oblasti vyvrtaných otvorů. Tedy tam, kde vzorek ztuhl bíle, kdežto po obrobení se akustická dráha L_u měřila na místech blíže ke středu, viz na *obrázku 36*.

Abych zjistil, jaký vliv má pouze drsnost povrchu na hodnotu akustické dráhy L_u , tak se provedla stejná měření jako předchozí, s tím rozdílem, že druhé měření se realizovala ze strany liciho povrchu, tedy ze strany tloušťky vzorků. Opět jsem se přesvědčil, že drsnost povrchu má velký vliv na hodnotu

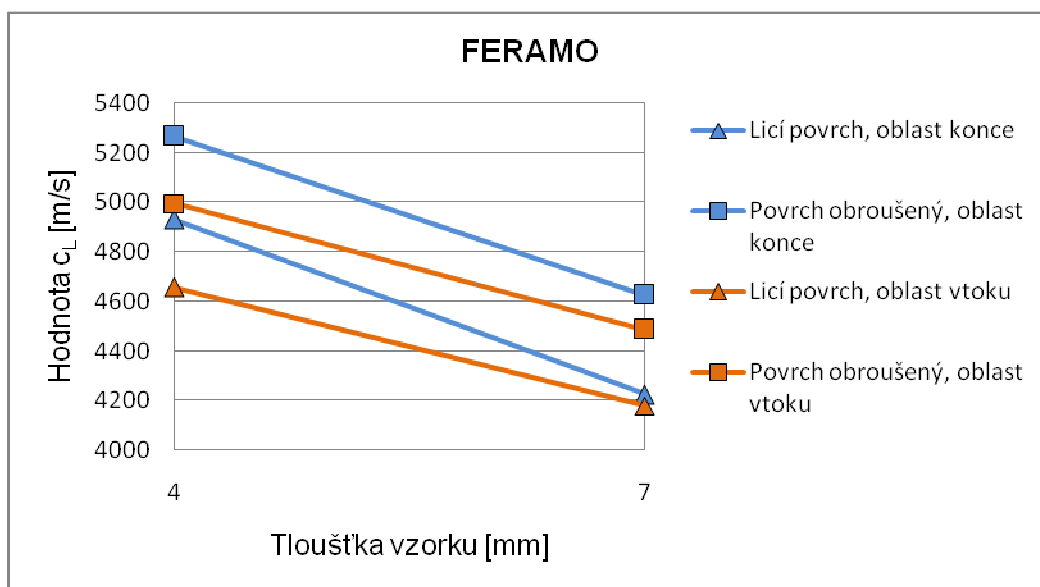
Lu měřených součástí, její hodnota u některých obrobených vzorků totiž klesla až o 0,4 mm.



Obrázek 36 – Vzorek připravený na zkoušku v tahu, místa měření Lu a M

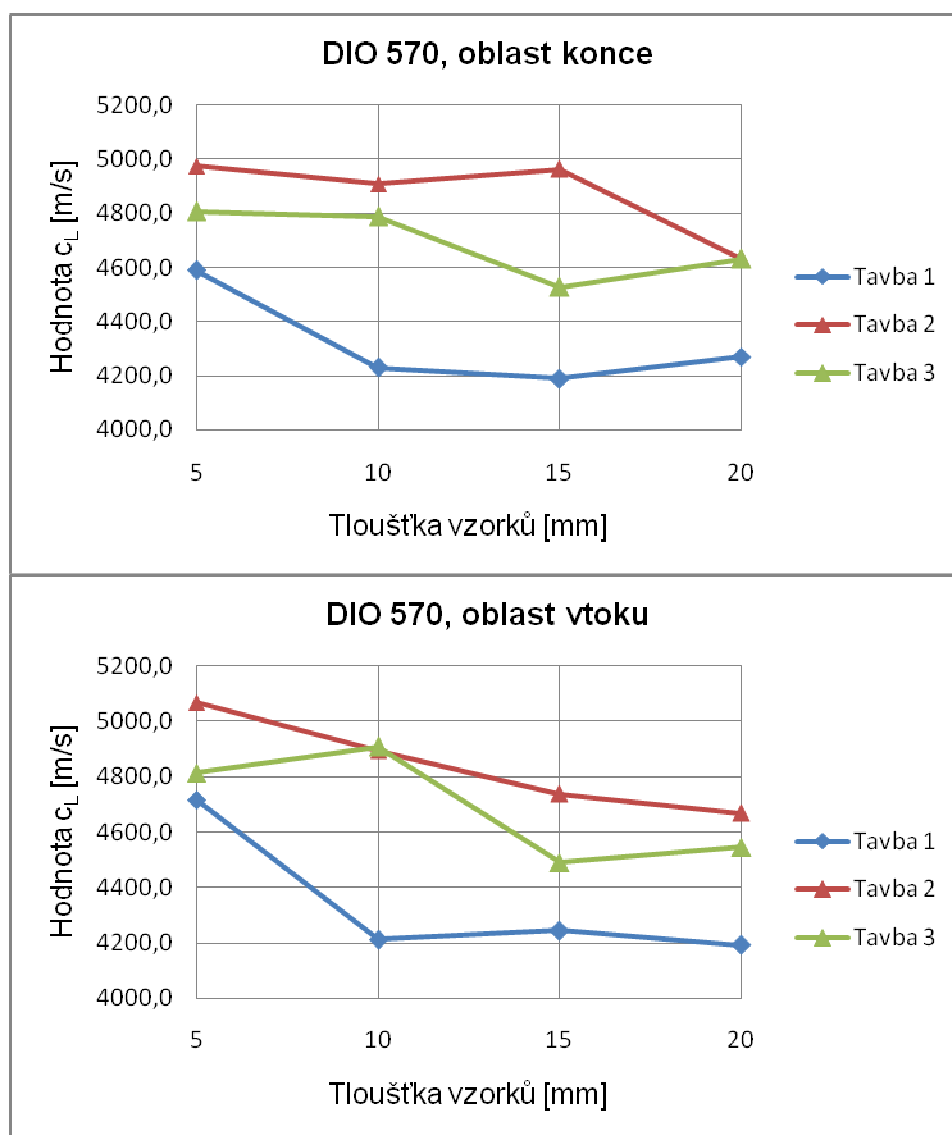
Tabulka 15 – Porovnání průměrných hodnot E_0 v závislosti na povrchu měřených vzorků slévárny FEREX

Označení tavby FEREX	Průměrná hodnota desek E_0 [GPa]		Zařazení do jakostní třídy dle E_0
	LP – litý povrch	OP – obrobený povrch	ČSN
1	102,7	107,1	422415
2	129,1	122,2	422420
3	120,3	122,2	422420



Graf 5 – Porovnání velikosti Lu měřené na litém a obrobeném povrchu vzorků slévárny FERAMO

U vzorků slévárny FEREX jsem neměl k dispozici zařazení taveb dle tříd jakosti. Podle *grafů 6* lze však určit jakost litinových vzorků podle velikosti c_L . Kde tavba 2 vykazuje nejvyšší jakost a naopak tavba 1 jakost nejnižší. Přesněji se pak dá zařadit jakost litiny podle velikosti počátečního modulu pružnosti E_0 (vypočtené hodnoty vzorku FEREX, viz *příloha 17*). Průměrné hodnoty a zařazení těchto taveb je zachyceno již ve zmíněné *tabulce 15*. Zařazené třídy jakosti mají u taveb FEREX větší hodnoty E_0 oproti *tabulce 5*, musíme ale brát v potaz, že měření akustické dráhy L_u probíhalo na místech, které bylo ovlivněno větší rychlostí ochlazování a také že hodnoty v *tabulce 5* jsou získány z tyčí o průměru 30 mm. Tavby 2 a 3 jsou, co se týče jakosti (hodnoty E_0), k sobě blízké.

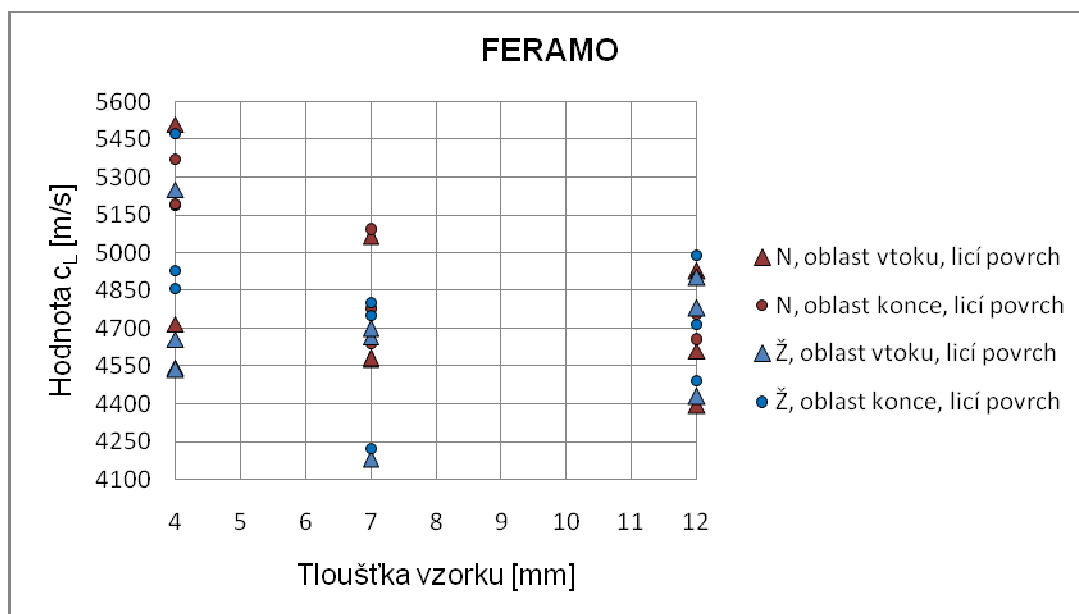


Grafy 6 - Vliv tloušťky a třídy jakosti GJL vzorků slévárny FEREX na hodnotu c_L

Tabulka 16 – Porovnání hodnot c_L u vzorků slévárny FERAMO před a po obrobení

FEREX Tavba	Tloušťka [mm] (měřeno přes 10mm)	c_L [m/s]			
		LP – litý povrch		OP – obrobený povrch	
		1 - K	3 - Z	1 - K	3 - Z
1	5	4588,0	4716,9	4326,8	4633,9
	10	4228,6	4211,2	4370,9	4485,1
	15	4188,3	4243,6	4284,2	4421,8
	20	4270,4	4191,3	4447,8	4423,5
2	5	4974,7	5068,4	4671,9	4700,2
	10	4909,3	4894,2	4852,0	4828,2
	15	4962,2	4736,0	4842,8	4847,6
	20	4630,9	4668,7	4772,3	4277,5
3	5	4807,4	4813,6	4262,7	4565,8
	10	4786,9	4907,7	4833,0	4772,3
	15	4526,7	4489,3	4837,9	4837,9
	20	4631,5	4546,0	4892,6	4781,9

V odlitku při jeho nerovnoměrném tuhnutí vzniká vnitřní pnutí, které způsobuje napjatost. Dalším úkolem bylo zjistit, zda toto pnutí nemá vliv na hodnotu akustické dráhy L_u (c_L). Proto se nechala část vzorků FERAMO vyžít pro odstranění vnitřního pnutí a část se nechala ve stavu po odlití. Graf 7 charakterizuje naměřené hodnoty L_u před „N“ a po žíhání „Ž“. Jak lze vyčíst z grafu, některé hodnoty L_u byly po žíhání větší, některé naopak menší. Nezjistila se spojitost mezi akustickou dráhou L_u a vnitřním pnutím.



Graf 7 – Porovnání hodnot c_L před a po žíhání k odstranění vnitřního prnutí

7.2 Člen druhý, hodnota zbytkové magnetizace M

Druhý člen matematického modelu R_m , jak jsem se již zmiňoval, charakterizuje hodnotu magnetické tvrdosti zjištěnou pomocí tvrdoměru DOMENA B3. Pomocí tohoto přístroje od výrobce ELKOSO Brno přímo z displeje stanovíme hodnotu tvrdosti HB a to z hodnot zbytkové magnetizace M [A/m] měřených vzorků pomocí matematického modelu viz vztah 20, kde se musí před měřením do paměti přístroje vložit z lineární regrese zjištěné konstanty A, B.



Obrázek 37 – Matematická závislost zbytkové magnetizace na hodnotu R_m podle modelu

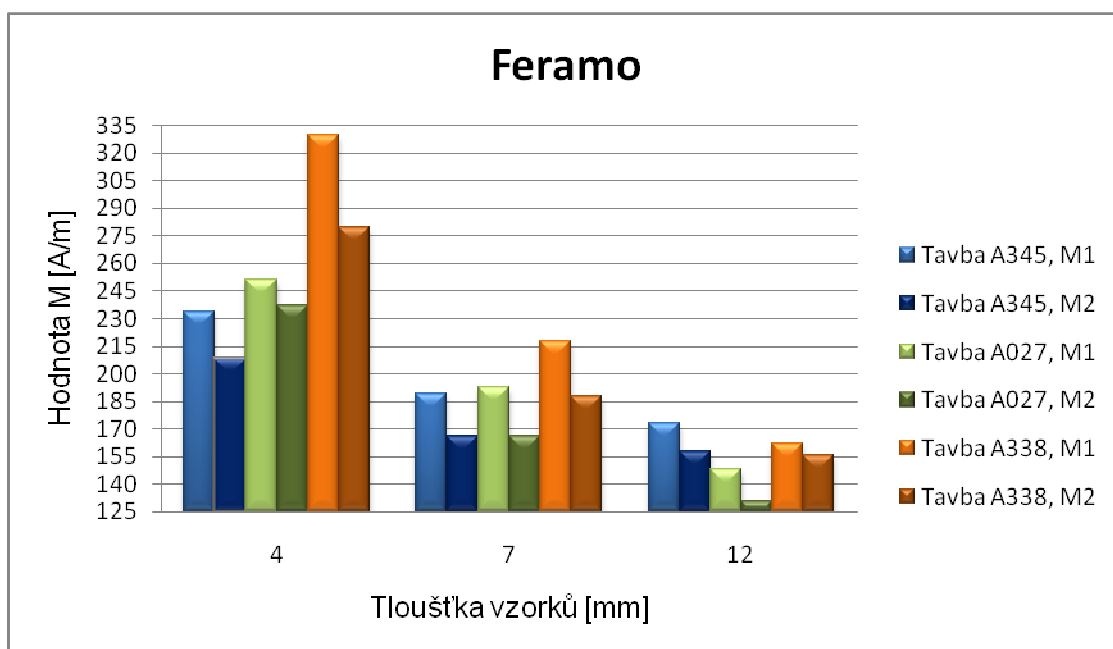
Hodnota zbytkové magnetizace nám hodně napoví o parametrech matrice (tvrdost, množství perlitu), ale také o druhu grafitu měřených litinových vzorků. Její hodnotu ovlivňuje několik hledisek:

- ◆ Prvním a hlavním hlediskem je správná kalibrace přístroje DOMENA - B3 před první sérií měření. Ta spočívá v nastavení zbytkové magnetizace M_0 podle etanolu o známé hodnotě a důležité je tuto hodnotu sledovat v průběhu měření po určitém počtu měření. Dále je také podstatné vhodně nastavit stupeň magnetizace, jelikož s rostoucí intenzitou magnetizace roste hloubka průniku magnetického pole, tedy přesnost měření. Při experimentech byla hodnota magnetizace nastavena na čtvrtém stupni.
- ◆ Vznik zbytkového magnetizmu závisí již na zmíněném stupni magnetizace, ale hlavně také na stavu magnetovaného materiálu. Nebyl-li měřený materiál před měřením nikdy magnetován, bude první hodnota magnetování větší, než další hodnoty při opakovaném měření. Velikost hodnoty se ustálí až po dalších zmagnetováních. Proto nám také obvykle druhá hodnota magnetizace řekne více o materiálu. Stavem materiálu se rozumí i jeho struktura, která ovlivňuje hodnotu zbytkové magnetizace. Ta se zvyšuje s rostoucím počtem atomárního pnutí, mřížkových poruch jako jsou dislokace či hranice zrn a překážek typu atomů uhlíku, cementitu Fe_3C a martenzitu.
- ◆ Stejně jako u měření akustické dráhy Lu, tak i u zbytkové magnetizace se může na tuto hodnotu projevit vliv kvality povrchu. V technické praxi se setkáváme s nutností měření metodou magnetického bodového pólu na součástech, které jsou zkorodované či okujené. Experimentálně bylo zjištěno, že povrchy po žíhání do 630 °C nevadí, ale jakmile by se jednalo o vyšší teploty, které jsou spojeny s oxidickými povrchy, či po vytlučení odlitku z formy, je nutno povrch před měřením otryskat. Jinak by docházelo k nárůstu zbytkového magnetizmu. Kvalita povrchu také souvisí s kontaktem sondy s materiálem, proto musí být povrch otryskán a bez hrubých výčnělků a zbytků oxidů.

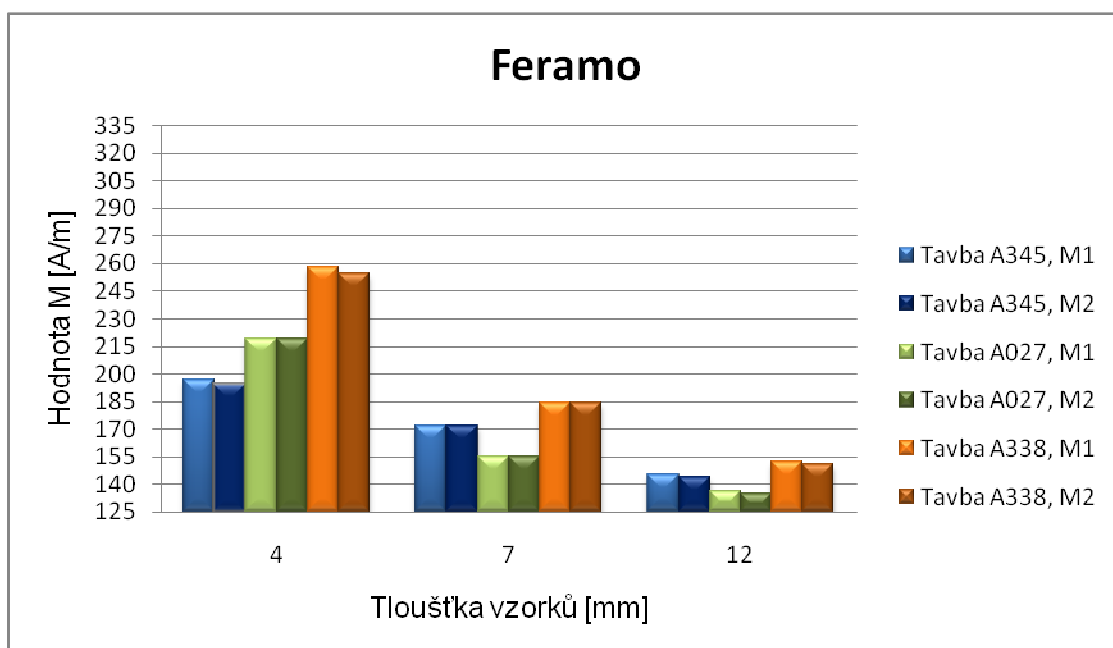
- ♦ Dalším vlivem na hodnotu zbytkové magnetizace M (H_r) je tloušťka měřených součástí. S hloubkou pole klesá vliv jednotlivých zrn na tuto hodnotu. V praxi do tloušťky 15mm. V tenčích stěnách se energie pulsu soustředí do menšího objemu zrn. S rostoucí tloušťkou stěny (0,5 – 15 mm) hodnota M ostře exponenciálně klesá. Nad 15 mm zůstává prakticky beze změny.
- Závislost zbytkové magnetizace na chemickém složení již experimentálně vysledoval pan Ing. Dočekal, který zjistil nárůst M od určitého obsahu mědi Cu v odlitcích z grafitických litin (přesněji Cu více zvyšuje magnetickou tvrdost než tu mechanickou). Opačný průběh má závislost křemíku Si na hodnotu M , kde s rostoucím obsahem klesá zbytková magnetizace M (resp. snižuje magnetickou tvrdost, mechanickou však Si zvyšuje).

Na vzorkách sléváren FERAMO a FEREX jsem provedl mnoho měření, abych posoudil všechny vlivy zkreslující hodnotu zbytkové magnetizace M . Každé měření jsem realizoval dvakrát na stejném místě, jelikož se tím vyloučí náhodné jevy a současně druhé měření více vypovídá o struktuře měřeného vzorku. Rozdíl mezi prvním a druhým měřením nám zas vypovídá o „magnetické minulosti“ měřených vzorků, tedy zda již někde např. nepřišly do styku s magnetickým polem.

Na *grafech 8, 9* je zobrazen rozdíl mezi první a druhou hodnotou zbytkové magnetizace M měřené na středu vzorků FERAMO. V druhém případě se jedná o rozdíl hodnot M po demagnetizaci vzorků pomocí ručního elektromagnetu REM2320 firmy ATG (viz *obrázek 38*). Je zjevné, že rozdíly hodnot první a druhé magnetizace jsou po demagnetizaci daleko menší, v některých případech jsou si sobě hodnoty M_1 a M_2 rovny. Také lze vyčíst, že hodnoty M_1 a M_2 po demagnetizaci klesly v porovnání s hodnotami před demagnetizací o: u M_1 průměrně o 36 A/m a u druhé magnetizace M_2 o 13 A/m. Z toho plyne, že největší vliv „magnetické minulosti materiálu“ má na první hodnotu zmagnetování, při dalším zmagnetování na témže místě nejsou již hodnoty M na tomto stavu tolik závislé.



Graf 8 - Porovnání rozdílu první a druhé magnetizace před demagnetizací vzorků slévárny FERAMO



Grafy 9 – Porovnání rozdílu první a druhé magnetizace po demagnetizaci vzorků slévárny FERAMO



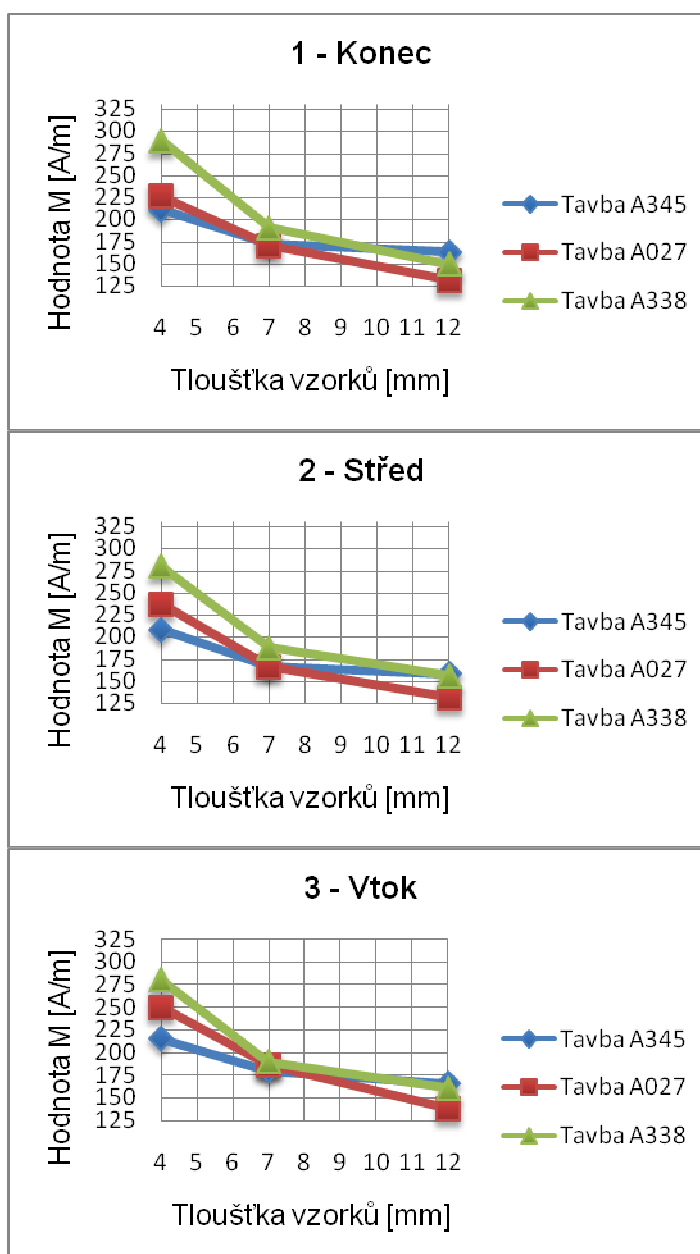
Obrázek 38 – Zařízení na demagnetizaci vzorků - Ruční elektromagnet REM2320

Jaký vliv má tloušťka na hodnotu druhé magnetizace můžeme pozorovat v *grafech 10*, které charakterizují vzorky slévárny FERAMO. Největší skok hodnot M je mezi tloušťkami stěn 4 a 7 mm. S rostoucí tloušťkou (0,5 – 12 mm) hodnota M ostře exponenciálně klesá, kolem 8 až 12 mm se začne ustavovat a nad 15 mm zůstává prakticky beze změny. Tzn., že u vzorků sléváren FERAMO, FEREX i TU bude pro každou tloušťku tenké stěny nutno vypracovat zvláštní rovnici (konstanty), jinak bychom dosahovali nepříznivých chyb výpočtu (nízkou hodnotu korelace). Musíme si však také uvědomit, že s rostoucí tloušťkou stěny klesá i mechanická tvrdost vlivem pomalejší rychlosti tuhnutí (menší podíl perlitu), tzn. pokles magnetické tvrdosti (pokles M).

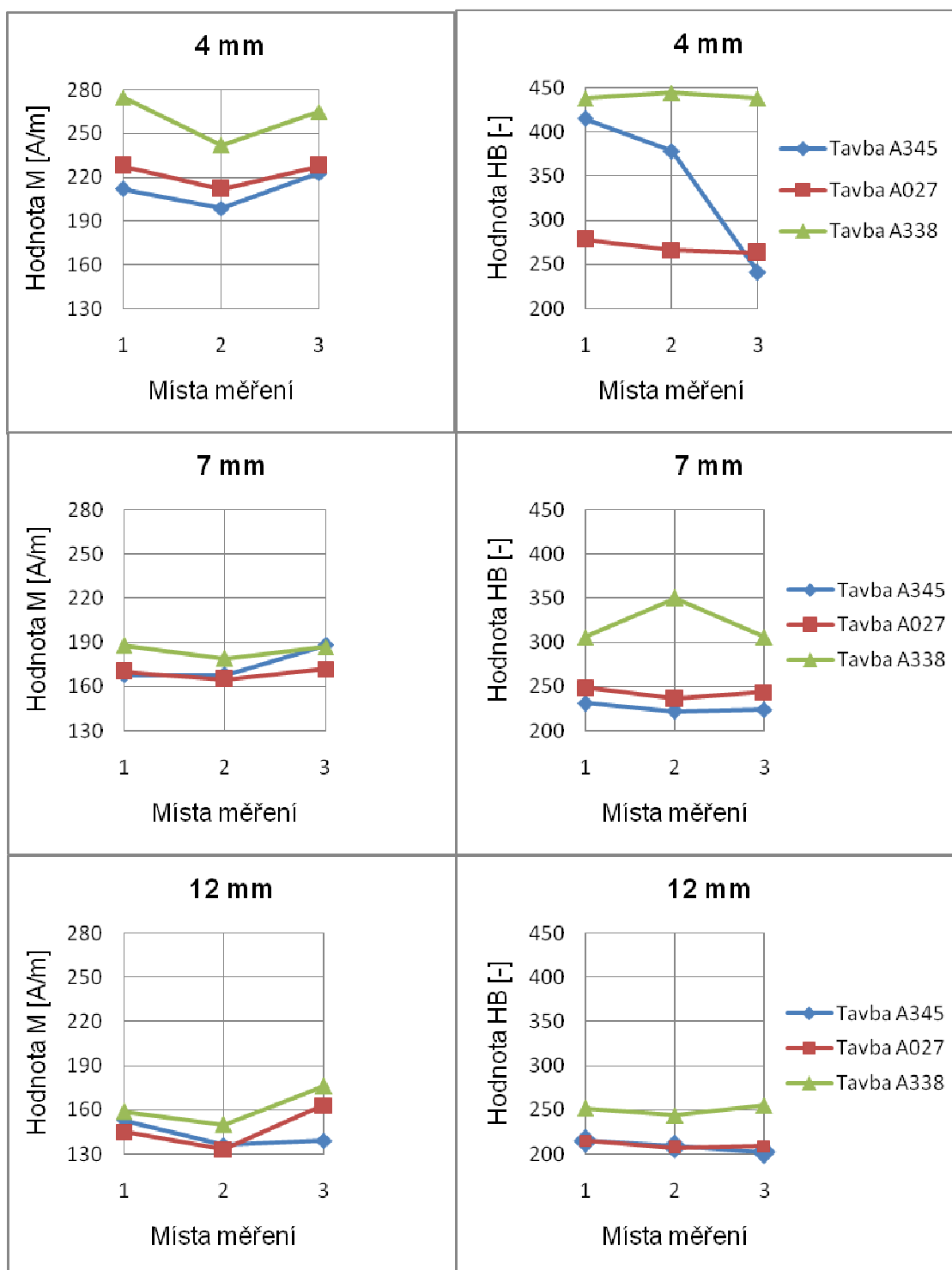
Protože hodnota zbytkové magnetizace roste (při konstantní matici) se štíhlostí útvarů grafitu, můžeme i pozorovat vliv jakosti vzorků na tuto hodnotu, je však vhodnější zařazení vzorků do jakostních tříd pomocí c_L resp. E_0 , protože nemůžeme zaručit konstantní matici vlivem odlišné rychlosti tuhnutí.

Hodnota M je přímo úměrná tvrdosti HB, resp. množství perlitu v matici. Takže místo, které ztuhlo na odlitku nejrychleji, má větší množství perlitu a tedy je i v tomto místě nejvyšší hodnota M . To je patrné v *grafech 11 a 12*, kde střed ztuhl pomaleji. Ve většině případů se dosahuje v oblasti konce vyšší nebo stejné hodnoty M_2 jako v oblasti vtoku, to je možné, jelikož rozdíl průtočnosti taveniny formou mezi vtokem a koncem není u vzorků FERAMO

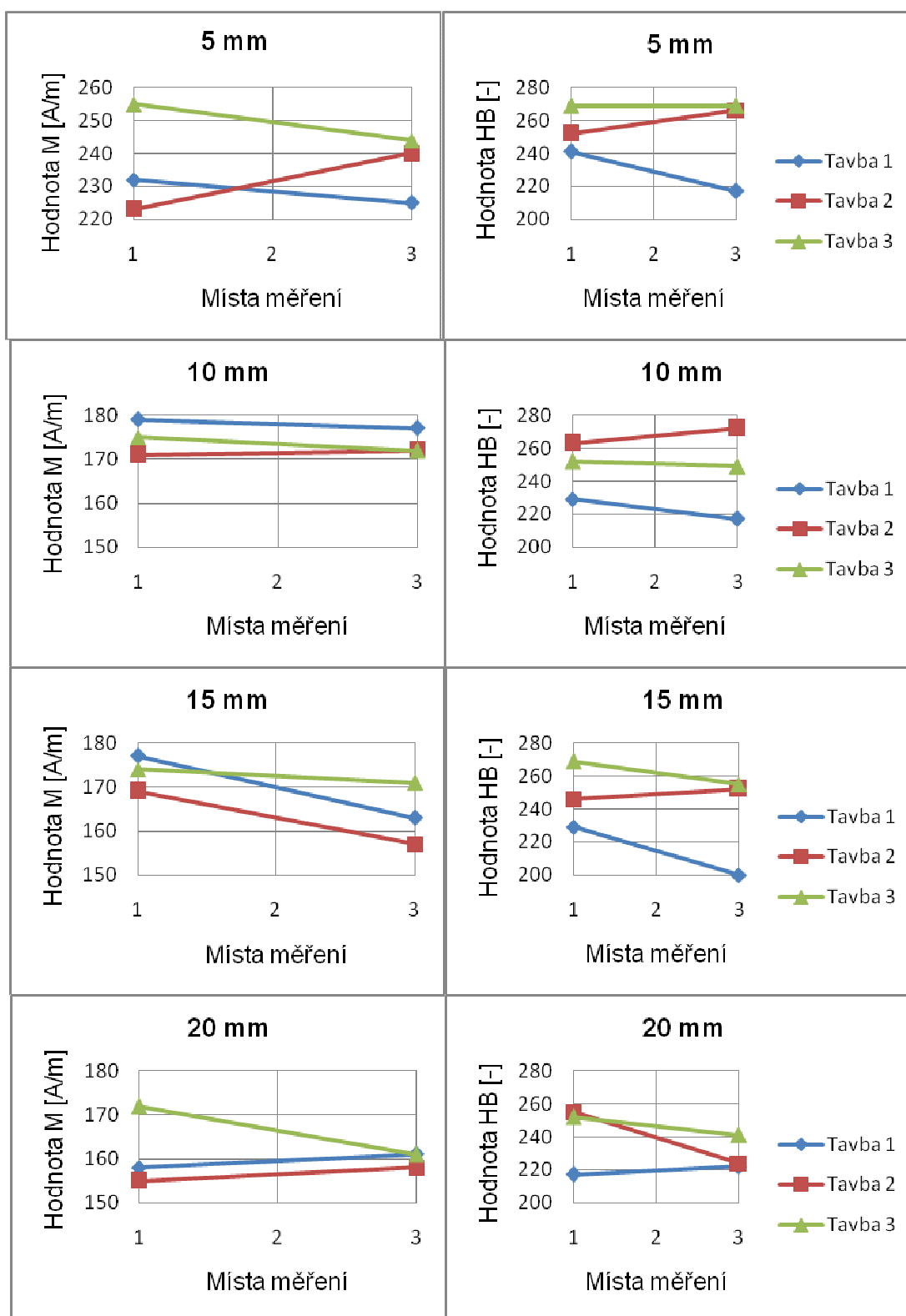
tak znatelný (což nám charakterizuje i naměřená tvrdost). Průměrně je hodnota M_2 zvýšena v oblasti vtoku o 15 A/m, v oblasti konce o 16 A/m než v oblasti středu. V některých případech je přímá závislost mezi tvrdostí HB a zbytkovou magnetizací M opačná, což mohl způsobit vpich do místa o odlišné struktuře než u místa při měření zbytkového magnetizmu, protože jsem jej nemohl měřit stejně jako tvrdost na kraji vzorků. Hodnota M je totiž také ovlivněná rohy či kraji vzorků, kde bychom měřili vyšší zkreslené hodnoty vlivem zvýšení hustoty magnetického pole.



Grafy 10 – Závislost zbytkové magnetizace na tloušťce stěny a jakosti měřených vzorků slévárny FERAMO



Grafy 11 – Porovnání hodnot zbytkové magnetizace M a tvrdosti HB v závislosti na místě měření vzorků slévárny FERAMO (1 – Konec, 2 – Střed, 3 – Vtok)



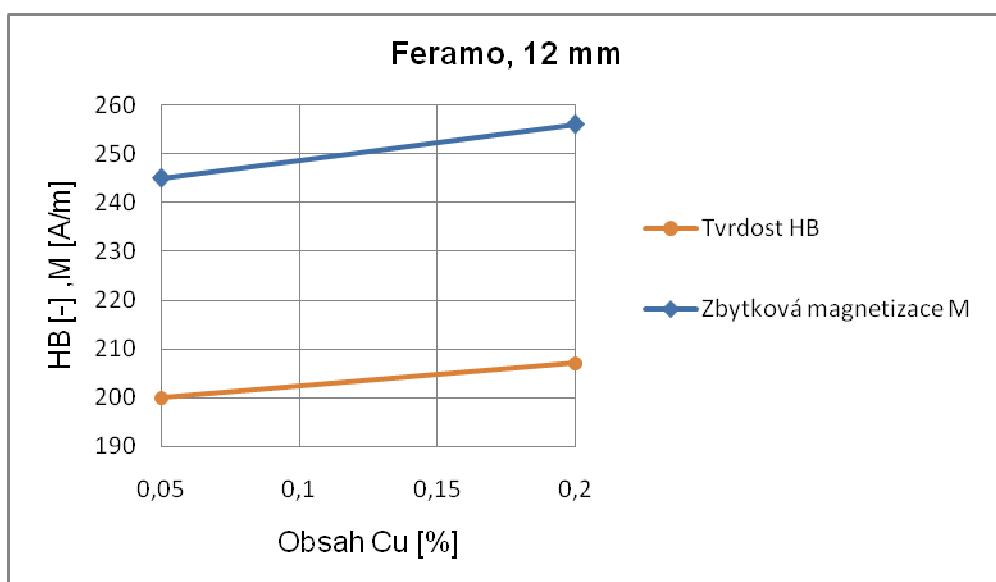
Grafy 12 - Porovnání hodnot zbytkové magnetizace M a tvrdosti HB v závislosti na místě měření vzorků slévárny FEREX (1 – Konec, 3 – Vtok)

Z *grafů 11 a 12* lze ještě vyčíst, že u taveniny A338 slévárny FERAMO dosahujeme nejvyšších hodnot tvrdosti HB, a tak u této taveniny je logicky i nejvyšší hodnota M (nejedná se však o vliv ledeburitické struktury, ta totiž na hodnotu M nemá vliv, jedná se o větší podíl perlitu v matrici). Dalším důvodem takovéto tvrdosti může být i vliv manganu, který podporuje krystalizaci dle metastabilní rovnováhy a u taveniny 3 slévárny FEREX je ho nejvíce, takže je větší pravděpodobnost, že vzorek ztuhne při rychlejším ochlazení s větším podílem perlitu, tedy že nevznikne grafitový eutektoid. Ten lze považovat podle pákového pravidla za zcela feritickou strukturu ($Mn = 0,76\%$). U dalších tavenin A027 a A345, však tato úvaha už neplatí.

U vzorků slévárny FEREX byla hodnota zbytkové magnetizace měřena vždy na začátku (3, u vtoku) a na konci desky (1). Jelikož tyto desky (viz *obrázek 14*) byly delší než vzorky slévárny FERAMO, mohl se pozorovat i vliv průtočnosti taveniny formou. Kde u vtoku je tato průtočnost největší a na konci je tomu naopak. V *grafech 12* je ve většině případů zřejmé, že v oblasti konce se dosahuje nepatrně větších hodnot M_2 vlivem zvýšené tvrdosti než v oblasti vtoku. Průměrná odchylka hodnot M_2 mezi oblastí konce a vtoku činí u vzorků slévárny FEREX jen 4 A/m (hodnota tvrdosti 7 HB). Což není velký rozdíl, když průtočnost v oblasti vtoku a konce u těchto vzorků je daleko větší než u vzorků FERAMO.

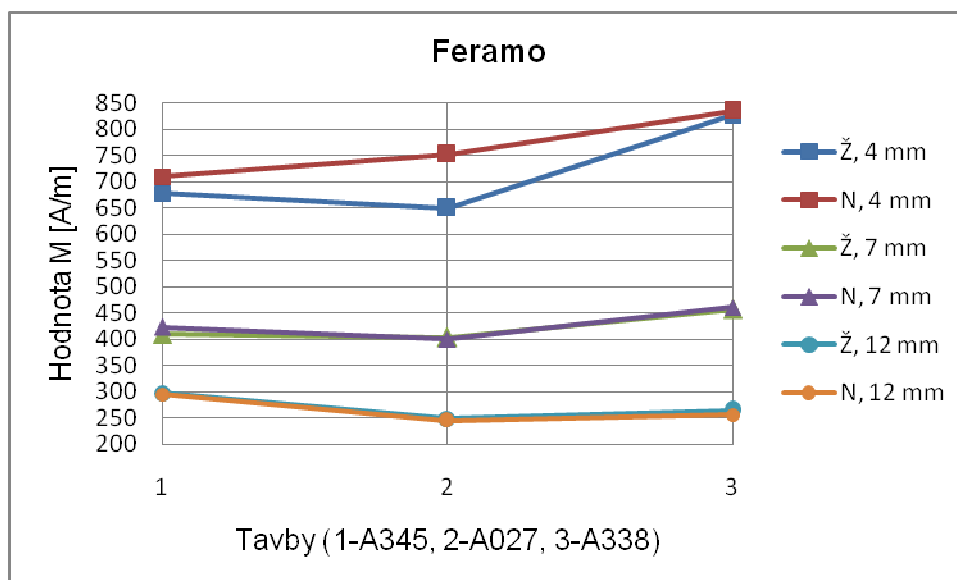
Vliv samotného chemického složení charakterizuje *graf 13*. Zobrazuje destičku slévárny FERAMO o největší tloušťce stěny, tedy 12 mm. Jako příklad jsem tuto tloušťku vzal proto, že jsou u ní nejvyrovnanější hodnoty tvrdostí v celém objemu všech tavenin stejných tloušťek. Zatím co tvrdost je u tavenin A027 a A338, které mají největší rozdíl obsahu Cu, s minimální odchylkou (taveniny A345 a A027 mají stejný obsah Cu), hodnota M se mění a je tak závislá na obsahu Cu. Lze si všimnout vyšších hodnot M než HB, což je způsobeno měřením na obrobené ploše, která byla daleko menší, než na které se prováděla měření tvrdosti. Hodnota M se totiž zmenšující se plochou zvyšuje, příčinou je ztráta (rozptyl) energie magnetického pulzu s rostoucí plochou. Pro připomenutí ještě uvádím, že Si snižuje magnetickou tvrdost, avšak mechanickou zvyšuje. Ve vzorcích sléváren FERAMO a FEREX nebyl velký rozsah Si, takže se tento vliv nemohl přesněji vysledovat (u vzorků GJS tuto vlastnost vysledoval pan Ing. Šmrha). Naopak Cu zase více zvyšuje

hodnotu M , resp. magnetickou tvrdost než mechanickou. Proto např. u vzorků tavby 1 slévárny FEREX a tavby A338 slévárny FERAMO dosahujeme nejvyšších hodnot M , protože tyto tavby obsahují zároveň nejvíce mědi. Musíme si také uvědomit, že přísady jako je Si, Mn a Cu ovlivňují i vznik druhu matrice. Resp. Si podporuje vznik feritu při pomalém ochlazování (pokles hodnoty M) a Cu, Mn naopak vznik perlitu při rychlém ochlazování (zvýšení hodnoty M). Jelikož měřené vzorky sléváren FERAMO a FEREX imitující tenké stěny odlitků měly největší tloušťku 20 mm, nemohlo se u nich zaručit pomalé ochlazování, a tak byl u těchto vzorků prokázán velký podíl perlitu (~80%) v matrici. Naopak vzorky slévárny TU obsahovaly pouze matrici feritickou.



Graf 13 – Vliv Cu na hodnotu M vzorků slévárny FERAMO

Vliv vnitřního pnutí se na hodnotu M neprokázal. Stejně tak jako na hodnotu akustické dráhy L_u se provedla měření před a po žíhání na snížení pnutí na vzorkách FERAMO. V grafu 14 je zřejmé, že vnitřní pnutí neovlivňuje hodnotu remanentní magnetizace M .



Graf 14 – Porovnání hodnot M před a po žíhání ke snížení vnitřního pnutí u vzorků slévárny FERAMO

7.3 Měření meze pevnosti v tahu R_m

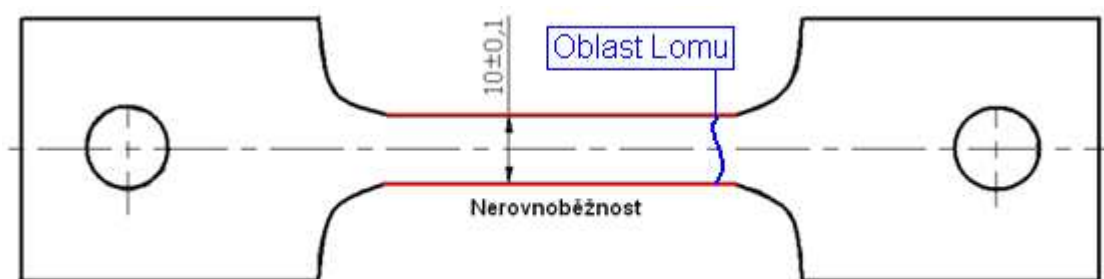
Obecně na hodnotu pevnosti odlitků z grafitických litin nemá vliv jen druh matrice, ale převážně tvar a rozložení grafitu, který jako samotný má velmi malou pevnost. Grafit zmenšuje nosný průřez základní kovové hmoty, a tím tak snižuje její pevnost. Současně na koncích útvarů grafitu dochází ke koncentraci napětí, takže grafit působí vrubovým účinkem. Čím ostrohranější je zakončení útvarů grafitu, tím větší je vrubový účinek.

Dalšími faktory, které ovlivňovaly pevnost měřených vzorků, byly vnitřní vady (nespojivosti), jako řediny či dutinky a různost struktur vlivem nerovnoměrného tuhnutí spojené se závislostí pevnosti na tloušťce stěn litinových vzorků z GJS.

Zvláštností litin s lupínkovým grafitem je totiž silný vliv rychlosti chladnutí odlitku na jeho strukturu a mechanické vlastnosti. Při pomalém chladnutí tuhne litina dle stabilního diagramu a má ve struktuře hrubý grafit a ferit. S rostoucí rychlostí chladnutí přibývá perlit na úkor feritu a zjemňují se lupínky grafitu. Roste-li rychlost chladnutí dále, začnou se ve struktuře již objevovat karbidy, až nakonec odlitek získá ledeburitickou strukturu. Z toho vyplývá, že pevnost odlitků se mění v závislosti na jejich tloušťce. Odlitek chladne tím pomaleji, čím je větší jeho objem a tím rychleji, čím větší je jeho povrch.

Pevnost měřených vzorků byla dále ovlivňována nerovnoběžností obrobených ploch na připravených tyčkách pro tahovou zkoušku (viz okótované obrázky příloha D a E). Tzn., že v některých případech došlo k deformaci v oblasti, viz *obrázek 39*, o průřezu S_{\min} vlivem nedodržené rovnoběžnosti ploch (jak u některých vzorků FERAMO, tak i u vzorků FEREX).

Naměřené pevnostní vlastnosti jako R_m a R_p jsou zachyceny v *přílohách C (přílohy 19-21)*. U vzorků z GJL bylo obtížné získávat mez kluzu R_p z důvodu velice nízké až nulové tažnosti, která tím pádem byla menší než 0,2% deformace. Takže používaný software (+laserový extenzometr) nebyl schopný tuto hodnotu spolu s tažností vypočítat.



Obrázek 39 – Zkušební tyčka

Co se týká vnitřních vad, tak ty se nejvíce projeví u vzorků GJS sérií JS, jelikož nebyly dostatečně nálitkovány a jsou podeutektoidního složení (vznik mikrostaženin vlivem dvoufázového tuhnutí). V *tabulce 17* jsou zachyceny hodnoty pevností s hodnotami podílů ředin na lomových plochách (v závorce %). Největší zastoupení ředin je u nejsilnějších vzorků, tedy 10 mm. Pravděpodobně je důvod v tom, že u těchto tloušťek jako první ztuhnou strany (tedy oblasti vtoku a konce) a uprostřed je ještě částečně tekutý kov. Tzn., že nemůže být doplněn kovem z vtokové soustavy a to má za následek vznik vad typu dutinek a ředin. U tenčích vzorků tento jev v takové míře nenastane důsledkem rychlého ztuhnutí celé destičky. Jen pro představu, u nejtenčích vzorků se podíl ředin pohybuje kolem 5 max. 15%. S klesající tloušťkou stěny tak klesá podíl vnitřních vad. Fotky lomových ploch o největším zastoupení ředin u vzorků GJS jsou k dispozici v *příloze F*. Ve výsledku to znamená, že vnitřní nespojitosti nám ovlivňují velikost skutečné meze pevnosti R_m , R_p a A , a tedy snižují koeficient korelace modelu pevnosti

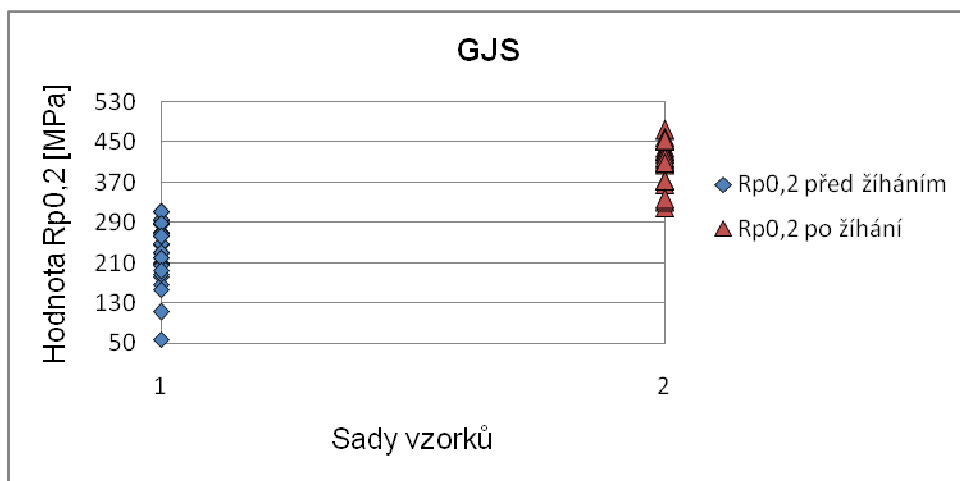
při konečné regresní analýze. Dále jsou řediny obtížně prozářitelné ultrazvukem, tedy může docházet k problémům při měření zařízení TELIT.

Tabulka 17 – Hodnoty R_m vzorků GJS + podíl ředin na lomové ploše (%)

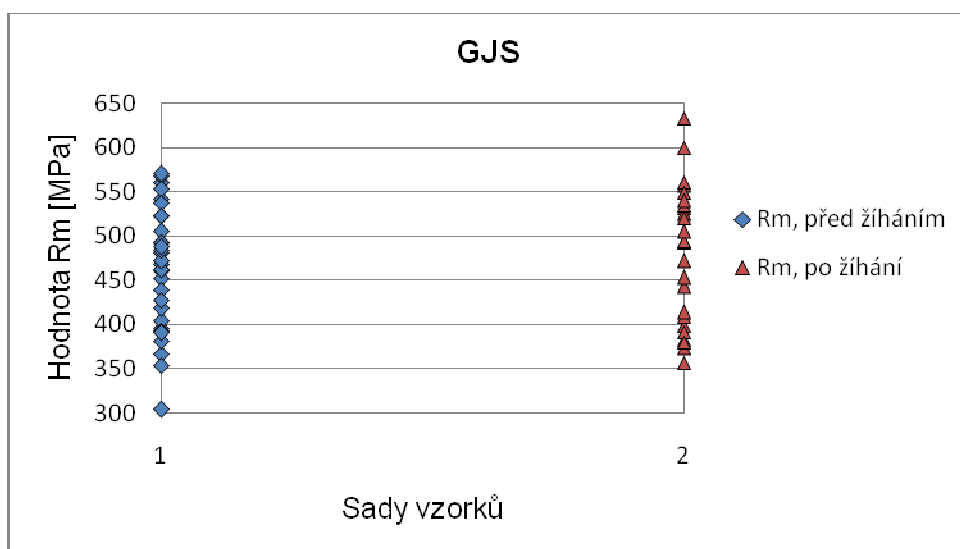
Série		JS17	JS18	JS19	JS20	JS21
R_m [MPa]	3	462(10)	505(5)	560(5)	542(5)	538(5)
	4	404(20)	523(5)	568(5)	570(5)	484(5)
	5	481(25)	472(10)	439(10)	553(10)	523(10)
	8	393(35)	492(20)	304(15)	391(40)	488(55)
	10	493(45)	381(50)	418(30)	354(40)	428(60)

U vzorků GJL sléváren FERAMO a FEREX nebyl žádný podíl ředin pozorován jen u tavby A345, tloušťky 7 mm bylo zastoupení ředin v lomové ploše 10%. U vzorku slévárny FERAMO došlo u tavby A345, tloušťky 5 mm k destrukci při manipulaci vzorku z přípravku po obrábění. Pravděpodobně se jedná vměstek, nespojitost materiálu.

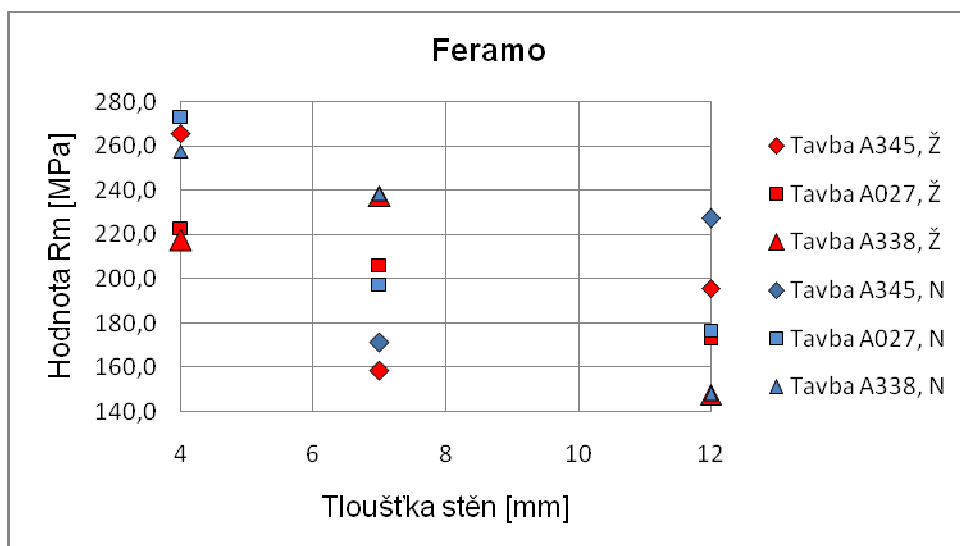
Stejně jako u měřených veličin Lu a M , tak se i měření pevnosti provedlo na vzorcích po žíhání ke snížení vnitřního pnutí. Jaký vliv má žíhání na mez kluzu $R_{p0,2}$ a pevnost R_m u vzorků GJS je vidět v *grafu 15 a 16*. Zatímco mez kluzu se po žíhání zvýšila řádově o 100 až 200 MPa, na mezi pevnosti se nárůst či pokles nepozoroval. Nárůst meze kluzu $R_{p0,2}$ se dá vysvětlit tak, že vnitřní pnutí způsobuje v odlitku napjatost, která brání odlitku se elasticky deformovat. Po odstranění této napjatosti (po žíhání) se tak logicky hodnota $R_{p0,2}$ zvýší. U vzorků z GJL se výrazný vliv vnitřního pnutí na mez pevnosti R_m rovněž nepotvrdil (viz *graf 17*).



Graf 15 – Porovnání hodnot meze kluzu $R_{p0,2}$ u vzorků GJS

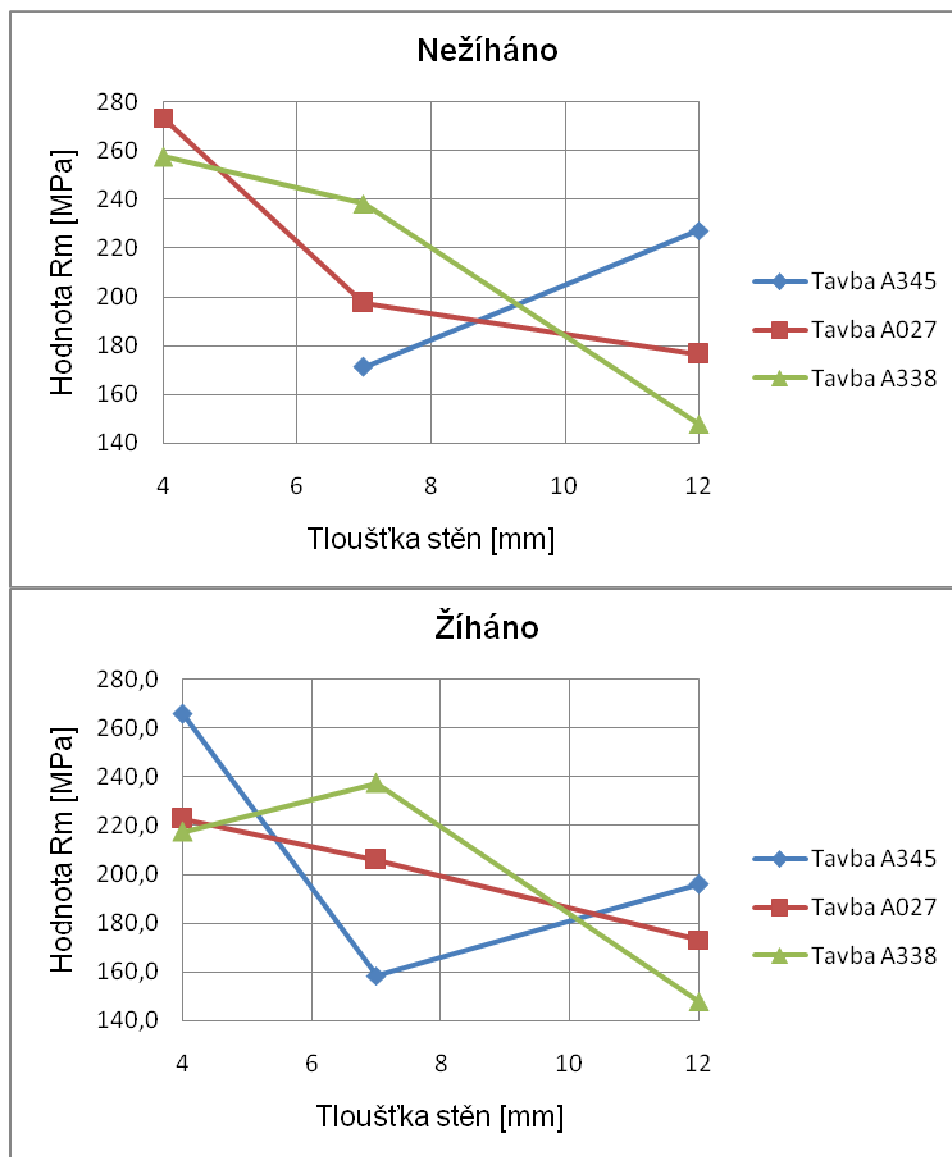


Graf 16 – Porovnání hodnot meze pevnosti R_m u vzorků GJS



Graf 17 – Porovnání hodnot meze pevnosti R_m u vzorků GJL

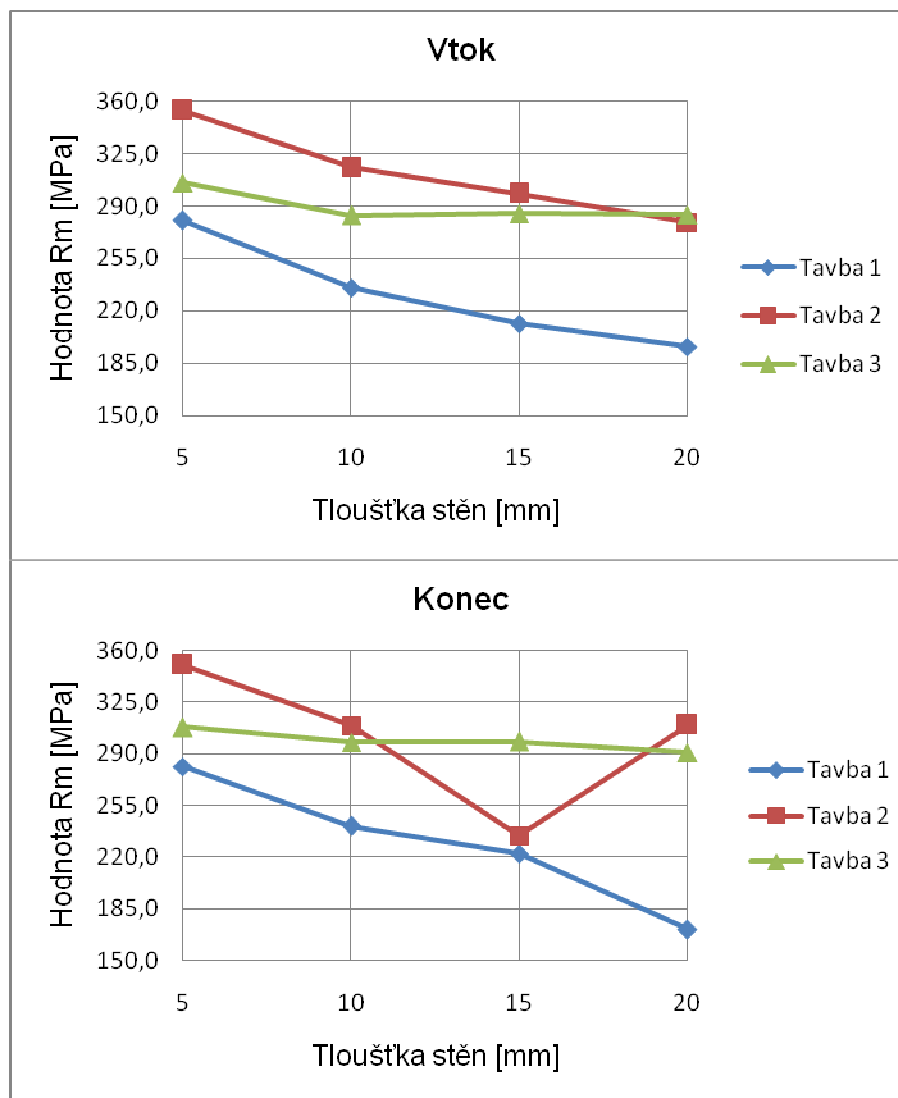
Na dalších *grafech* 18, 19 je zobrazen vliv tloušťky stěn vzorků na hodnotu meze pevnosti R_m . Viz druhý odstavec kapitoly 7.3. Pro připomenutí, vzorek tavby A345 slévárny FERAMO (4 mm) byl před zkouškou v tahu již znehodnocen. Velký nárůst pevnosti R_m je u nejtenčích vzorků způsoben větší rychlostí ochlazování, tedy vznikem jemného lupínku na středu vzorků (v oblasti destrukce). Kdežto na krajích byla rychlost ochlazování tak velká, že již vznikla ledeburitická struktura. Ta také způsobila problémy při vyvrtávání otvorů sloužící pro úchyt do čelistí trhačky, jelikož místa byla velice tvrdá a křehká. Způsobilo to, že u některých vzorků došlo k deformaci právě v oblasti otvorů díky ovlivnění povrchu po vrtání. Pokud je některá hodnota pevnosti větší u vyšší tloušťky stěny než u té tenčí (tavba A345, tloušťka 7 mm), jedná se o zkreslení hodnoty vlivem nerovnoběžnosti ploch na zkušebních plochách vzorkách, kde došlo k destrukci v místě o menším S_0 než se předpokládalo, viz *obrázek* 39.



Grafy 18 – Vliv tloušťky stěn měřených vzorků slévárny FERAMO na hodnotu pevnosti R_m

U vzorků slévárny FEREX se porovnávala pevnost v oblasti vtoku a konce. Jelikož se jedná o delší odlitky typu desek, kde rychlost průtoku taveniny formou je u vtoku a konce odlišná, předpokládalo se, že oblasti konce a vtoku budou mít i odlišnou strukturu, tedy pevnost R_m . To se však neprokázalo již při měření Lu či M , kde se hodnoty od sebe moc nelišily. A tak ani hodnota pevnosti není rozdílná v porovnání mezi oblastí konce a vtoku. Rozdíl pevností je jen řádově o 1 až 20 MPa, a to jsme se domnívali, že bude daleko více. Co se týče vlivu jakosti litiny GJL na hodnotu pevnosti, tak již podle měření akustické dráhy Lu , resp. vypočtené rychlosti ultrazvukových vln c_L , se ukázalo, že tavba 2 slévárny FEREX vykazuje nejméně překážek, a

tedy že je z hlediska grafitu nejjemnější. Takže hodnoty pevnosti R_m u této tavby, musí být prokazatelně nejvyšší, protože grafit méně působí svým vrubovým účinkem.



Grafy 19 - Vliv tloušťky stěn měřených vzorků slévárny FEREX na hodnotu pevnosti R_m

V tabulce 18 jsou zobrazeny pro porovnání hodnoty pevnosti mezi polotovary typů desek a tyčí slévárny FEREX. Lze z nich odvodit, do jaké míry se u každé tavby vzorků typu desek projevil vliv strukturní nehomogenity, vnitřních nespojitostí apod. Jelikož u polotovarů ve tvaru tyčí se dosahuje daleko rovnoměrnějšího průběhu tuhnutí, dosahuje se u těchto tyčí větších hodnot pevnosti R_m .

Tabulka 18 - Porovnání hodnot pevnosti R_m mezi vzorky typu desek a tyčí slévárny FEREX

Tavba	Typ vzorku	R_m [MPa]	Rozdíl [MPa]
1	Ø30	220,9	38
	20x10	182,9	
2	Ø30	300,4	6,4
	20x10	294	
3	Ø30	300,4	12,8
	20x10	287,6	

7.4 Matematické modely pro nedestruktivní stanovení

tvrdosti HB, konstanty A, B pro přístroj DOMENA

Pro stanovení magnetické tvrdosti HB se používá vztah 20, kde důležitou roli hraje naměřená hodnota zbytkového magnetizmu M s použitím přístrojem DOMENA B3.

Pro zopakování: $HB = A \cdot M + B$

A, B jsou konstanty, jejichž hodnoty jsem stanovil pomocí metody lineární regrese v programu Microsoft Excel. K experimentálně změřeným hodnotám zjištěných na všech vzorkách je nutno přistupovat z hlediska vhodnosti pro optimální regresní analýzu, a tak jsem vynechal data se zjevnými nelogickými extrémy. Pro hodnocení úspěšnosti regrese není rozhodující jen velikost korelačního koeficientu R, nebo jeho druhá mocnina, ale střední chyba Δ s kterou daná veličina měří.

Jelikož je hodnota M závislá na měřené tloušťce stěn odlitků a to v praxi platí do 15 mm, je nutné vytvořit modely pro každou tloušťku menší než 15 mm. V tabulce 19 a 20 jsou zobrazeny matematické modely pro jednotlivé tloušťky vzorků sléváren FERAMO, FEREX a vzorků série JS včetně střední chyby Δ a korelačního koeficientu K. Z tabulky je zřejmé, že u druhých magnetizací M2 a s rostoucí tloušťkou stěn dosahujeme vyšších koeficientů korelace a také menších středních odchylek. Menší koeficient korelace u

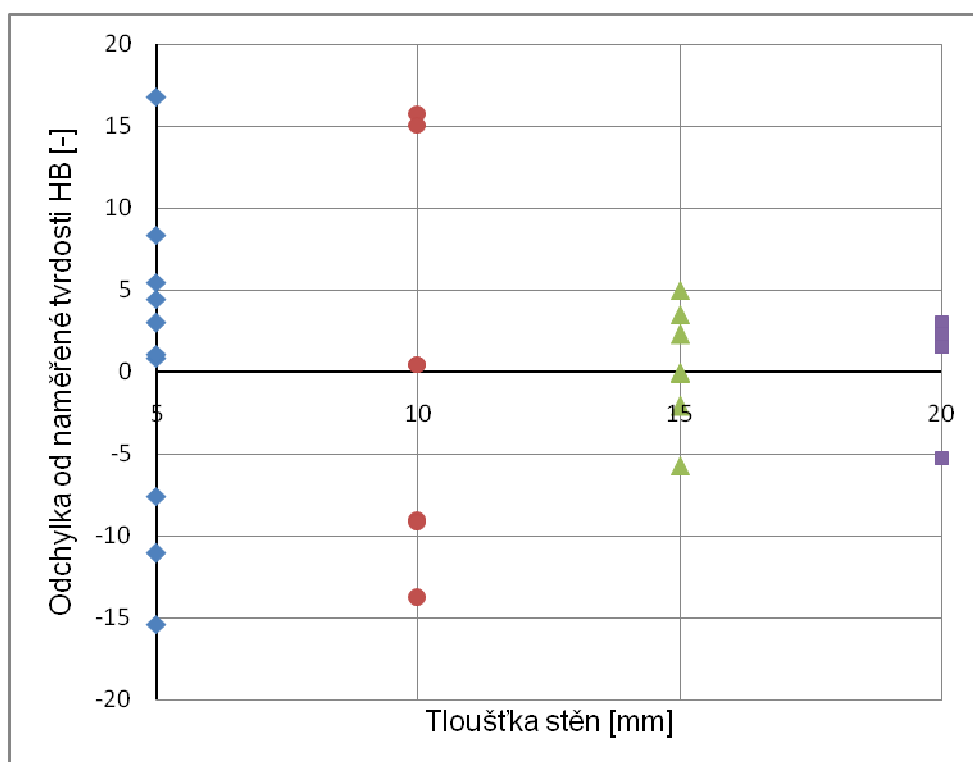
vzorků GJS je dán tím, že tyto vzorky obsahovaly pouze feritickou matici, což ze statistického hlediska snižuje tento koeficient. V *grafech 20 až 22* jsou pro představu zobrazeny odchylky mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami tvrdosti HB (pomocí hodnoty magnetizace M2) všech měřených vzorků.

Tabulka 19 – Matematické modely tvrdosti HB vzorků slévárny FERAMO a FEREX stanovené z lineární regrese

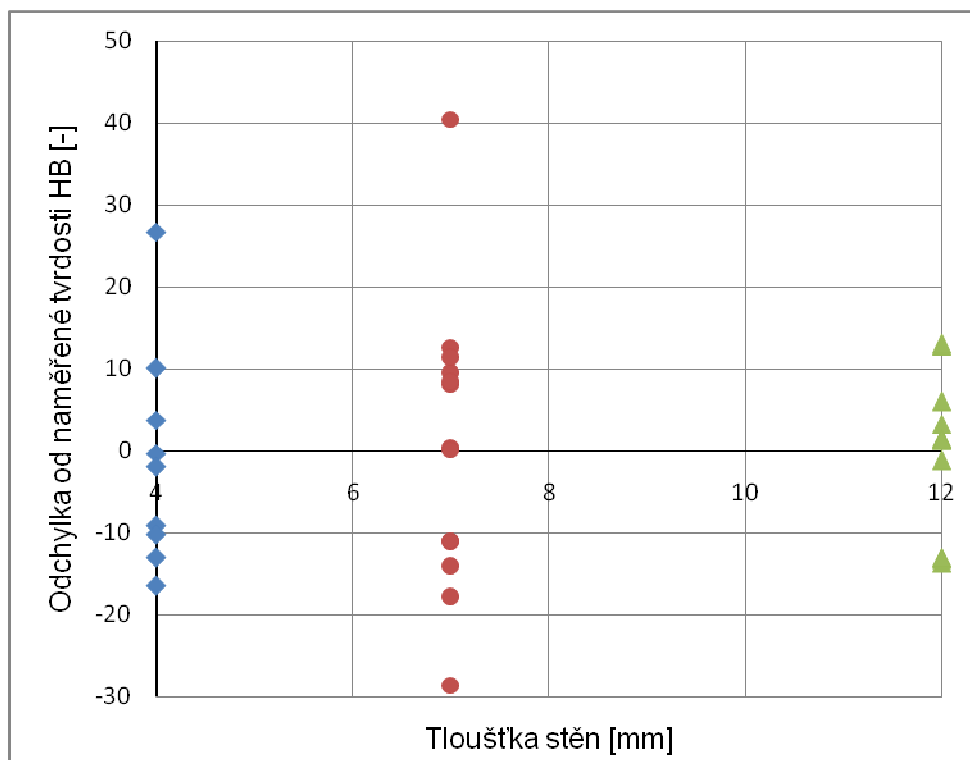
FERAMO GJL, tloušťka stěny [mm]	Magnetizace	Matematický model HB ($HB = A \cdot M + B$)	Δ	K
4	M1	$HB = 0,39 \cdot M + 325,2$	11,2	0,729
	M2	$HB = 0,5 \cdot M + 285$	10,2	0,832
7	M1	$HB = 2,26 \cdot M - 161,5$	15,7	0,897
	M2	$HB = 3,18 \cdot M - 302,8$	13,4	0,791
12	M1	$HB = 1,45 \cdot M - 7,44$	8,4	0,873
	M2	$HB = 1,75 \cdot M - 39,98$	7,3	0,906
FERAMO tyče Ø 30 mm				
Nežíhaný	M1	$HB = 0,75 \cdot M + 43,73$	6,3	0,893
	M2	$HB = 0,8 \cdot M + 41,63$	6,1	0,894
Žíhaný	M1	$HB = 1,15 \cdot M - 34,45$	1,8	0,994
	M2	$HB = 0,963 \cdot M + 16,93$	3,9	0,970
FEREX GJL, tloušťka stěny [mm]	Magnetizace	Matematický model HB ($HB = A \cdot M + B$)	Δ	K
5	M1	$HB = 1,34 \cdot M - 85,76$	7,8	0,794
	M2	$HB = 1,45 \cdot M - 106,4$	7,4	0,769
10	M1	$HB = 2,25 \cdot M - 164,1$	7,0	0,707
	M2	$HB = 4,81 \cdot M - 597,3$	9,1	0,902
15	M1	$HB = 0,28 \cdot M + 189,9$	1,3	0,828
	M2	$HB = 0,3 \cdot M + 186,8$	2,7	0,800
20	M1	$HB = 1,47 \cdot M - 20,16$	4,2	0,851
	M2	$HB = 1,4 \cdot M - 4,47$	2,4	0,968

Tabulka 20 - Matematické modely tvrdosti HB vzorků slévárny TU z GJS stanovené z lineární regrese

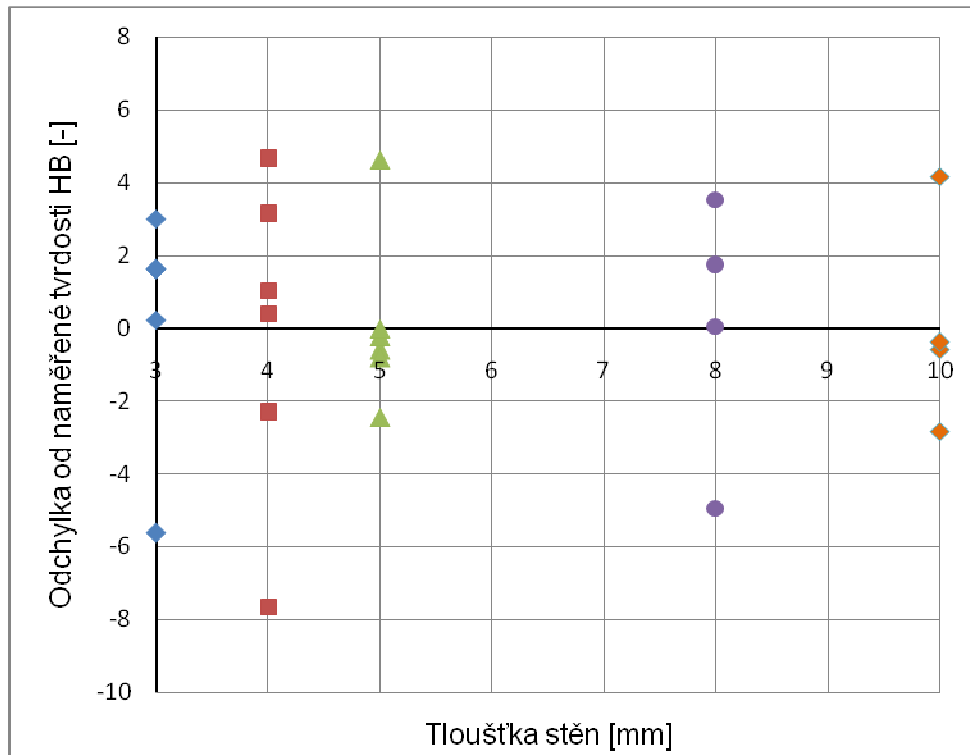
TU GJS, tloušťka stěny [mm]	Magnetizace	Matematický model HB ($HB = A \cdot M + B$)	Δ	K
3	M1	$HB = 0,21 \cdot M + 186$	3,8	0,43
	M2	$HB = 0,33 \cdot M + 178,2$	2,4	0,80
4	M1	$HB = 0,35 \cdot M + 178,8$	3,6	0,69
	M2	$HB = 0,35 \cdot M + 179,8$	3,2	0,74
5	M1	$HB = 0,21 \cdot M + 185,5$	1,9	0,62
	M2	$HB = 0,25 \cdot M + 183,9$	1,5	0,78
8	M1	$HB = 0,73 \cdot M + 171,3$	3,5	0,69
	M2	$HB = 0,78 \cdot M + 170,5$	2,6	0,79
10	M1	$HB = 1,04 \cdot M + 158,2$	3,4	0,86
	M2	$HB = 1,18 \cdot M + 154$	2,0	0,85



Graf 20 - Odchylky hodnot naměřených tvrdostí od vypočtených u vzorků slévárny FEREX



Graf 21 - Odchylky hodnot naměřených tvrdostí od vypočtených u vzorků slévárny FERAMO



Graf 22 - Odchylky hodnot naměřených tvrdostí od vypočtených u vzorků slévárny TU (GJS)

7.5 Výstupní naměřené hodnoty pro získání konstant do matematického modelu pevnosti R_m

V přílohách G (26-28) jsou uvedené tabulky s daty, které slouží pro získání konstant C, D, E vztahu podle obrázku 34. Tato data jsou výstupní veličiny (X1, X2, Y) získané měřením a lze z nich vyčíst problémy, kterými jsem se zabýval v diskuzi výsledků. Ovlivňují výsledné hodnoty řešených konstant, tzn., hodnotu koeficientu korelace neboli míru spolehlivosti tohoto modelu.

Pomocí výsledku těchto dat, lze umožnit případnou nápravu, resp. zvýšení koeficientu korelace. Ta je závislá jak na vlastním měření pomocí zařízení TELIT, tak na vlastnostech měřeného odlitku z grafitických litin.

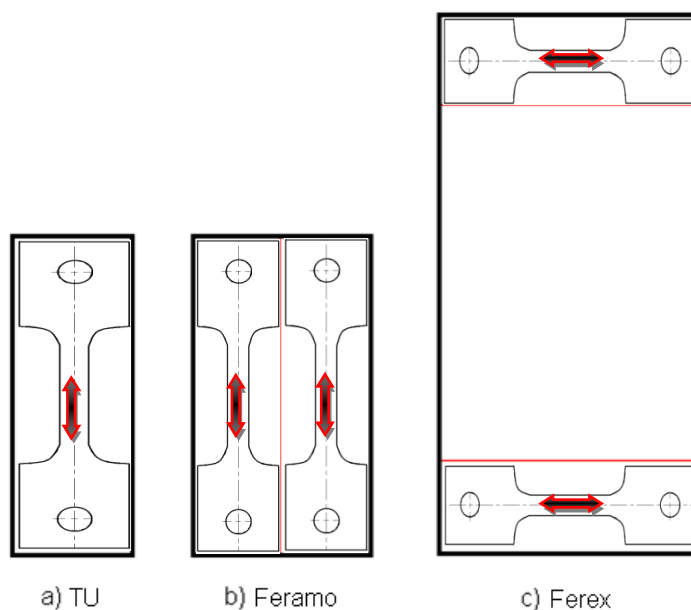
V příloze 26 jsou zobrazeny výstupní veličiny vzorků slévárny FERAMO. U této slévárny nastal problém, že všechna data nekorespondují (není stejná závislost naměřených hodnot) s jednotlivými tavbami, tzn., výsledný model bude mít nízký koeficient korelace. Z metalurgického hlediska je nejlepší taková litina, která má nízkou hodnotu poměru L/Lu, resp. nízkou ultrazvukovou rychlost (správně vyloučený grafit), spolu s nízkou hodnotou tvrdosti HB (feritická matrice) a vysokou pevností R_m . Takový případ je např. u vzorku tavby A345, tloušťky stěny 12 mm. Kdežto u vzorku tavby A338, tloušťky stěny 12 je tomu naopak. Pro zvýšení koeficientu korelace je vhodné vytvořit větší soubor dat, aby se částečně eliminovaly nepříznivé faktory.

Naopak u vzorků slévárny FEREX, jsou data korespondující jak s jednotlivými tavbami, tak i s tloušťkami, a tak se pro tuto slévárnu může vytvořit jeden matematický model pevnosti (data FEREX viz příloha 27).

U výstupních veličin vzorků slévárny TU z GJS je situace taková (viz příloha G-28), že naměřené hodnoty vykazují určitou závislost u tloušťek 3, 4, 5 a jinou u tloušťek 8 a 10. Proto doporučuji vytvořit z naměřených dat dva modely pevnosti, a to pro tloušťky 3, 4, 5 ($R_{m\ 3,4,5}$) a 8,10 ($R_{m\ 8,10}$).

Pro upřesnění ještě dodávám, že v této práci se pracovalo se třemi typy polotovarů (odlitků). Vzorky TU - GJS byly odlity jednotlivě, z nichž byly vytvořeny ploché vzorky na trhačku. Vzorky slévárny FERAMO byly dvojité,

kde jedna půlka se trhala ve stavu po odlití a druhá po žíhání. Vzorky slévárny FEREX jsou polotovary typu delších desek, kde část určená ke zkoušce v tahu byla oblast vtoku a konce. Jelikož nejvěrohodnějších dat se docílilo u vzorků slévárny FEREX, dostáváme poznatek, že nejlepší polotovary pro zkoušku v tahu (z hlediska naměřených dat) budou takové, které nejsou odlity samostatně, ale jsou vytvořeny jako dílčí z větších odlitků.



Obrázek 40 - Typy měřených polotovarů (a - jednotlivé, b - dvojité, c - velké)

↔ - místa záznamu pevnosti R_m

— - místa řezu

7.5.1 Regresní analýza modelu pevnosti R_m a jeho řešení

Vytvořená výstupní data se podrobila logaritmické regresní analýze za pomoci prof. Ing. M. Olehly, Csc. z katedry aplikované kybernetiky. Konstanty se realizovaly podle vztahu 32 z naměřených dat. Konečné matematické modely jsou zobrazeny v *tabulce 21*.

$$\ln Y = \ln C + D \cdot \ln X1 + E \cdot \ln X2 \quad (32)$$

Kde:	C, D, E ...	Konstanty	X1...	L/Lu
	Y...	R_m	X2...	HB

Tabulka 21 - Výsledné matematické modely pevnosti pro slévárny FERAMO, FEREX a TU

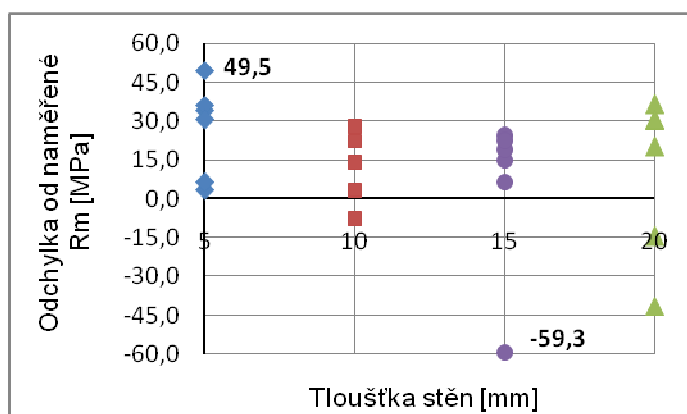
Omezení: tloušťka [mm]	Model R_m $(R_m = C \cdot (L/Lu)^D \cdot HB^E)$	Δ [MPa]	F-test
FERAMO desky GJL			
4	$R_m = -3,06 \cdot (L/Lu)^{-4,19} \cdot HB^{1,35}$	17,8	0,94
7			
12			
FEREX desky GJL			
5	$R_m = 1,43 \cdot (L/Lu)^{1,48} \cdot HB^{0,82}$	23	1
10			
15			
20			
TU desky GJS			
3	$R_m = 7,16 \cdot (L/Lu)^{19,11} \cdot HB^{-0,18}$	68,2	0,048
4			
5			
8	$R_m = 5,55 \cdot (L/Lu)^{0,097} \cdot HB^{0,086}$	44,3	0,009
10			

Nejvěrohodnější konstanty a tedy model s nejvyšší spolehlivostí podle F-testu (Fisherový test významnosti) mají vzorky slévárny **FEREX Liberec**. Střední chyba Δ , s kterou tento model počítá, je 23 MPa. Z toho max. chyba je -59,3 MPa (tavba 2, tloušťka stěny 15 mm, oblast konce) a 49,5 MPa (tavba 2, tloušťka stěny 5 mm, oblast konce), viz *graf 23*. Tyto extrémy jsou s největší pravděpodobností způsobeny nedodržením rovnoběžnosti obrobených ploch (10 mm) na zkušebních tyčkách.

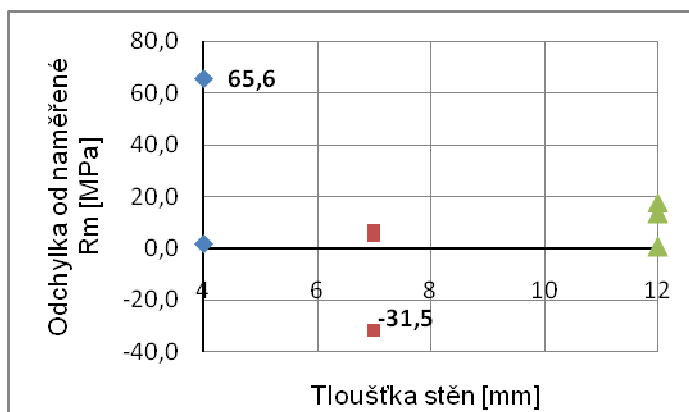
U vzorků slévárny **FERAMO Brno** jsou největší odchylky zobrazeny v *grafu 24*. Největší chyba 65,6 MPa (tavba A027, tloušťka stěny 4 mm) je způsobena extrémní hodnotou vypočtené pevnosti vlivem ledeburitické struktury. Naopak chyba -31,5 MPa je ovlivněna vnitřní nespojitostí tohoto vzorku (tavba A345, tloušťka stěny 7 mm). Tzn., že pro ovlivnění hodnoty vypočtené pevnosti pomocí tohoto modelu je největším nebezpečím právě ledeburitická struktura. Tuto skutečnost by bylo vhodné ošetřit

experimentálním vztahem, který by pomocí hodnoty poměru L/L_u zjistil, zda se uhlík ještě vyloučil správně, tedy ve formě grafitu či nikoliv. Pro menší počet dat u vzorků FERAMO však tuto závislost nelze přesněji vysledovat. Ledeburitickou strukturu lze však odstranit co nejúčinnějším očkováním, tj. z optimální lící teploty a co nejtěsněji před začátkem tuhnutí litiny. Za 5 min klesá účinek očkovačla na méně než polovinu. Třeba očkování přímo do proudu taveniny před vstupem do formy, nebo umístění očkovačla ve formě granulátu do vtokové soustavy.

Podle předpokladů se nejhorších výsledků regresní analýzy dosáhlo u vzorků JS slévárny **TU Liberec**, které měly ve všech vzorcích konstantní matici i tvar grafitu. Pro extrémní odchylky mezi naměřenými a vypočtenými pevnostmi nelze tyto modely použít (velký rozptyl všech konstant C , D , E = nevyhovující F - test). Lze však zjednat nápravu pro případný další výzkum (viz kapitola 8. Závěr).



Graf 23 - Odchylky hodnot naměřených pevností R_m od vypočtených u vzorků slévárny FEREX



Graf 24 - Odchylky hodnot naměřených pevností R_m od vypočtených u vzorků slévárny FERAMO

8. ZÁVĚR

Z naměřených dat je zřejmé, jaké problémy mohou nastat při měření pomocí zařízení TELIT na tenkých odlitcích, u kterých např. není zaručena homogenita struktury, rovnoměrnější ochlazování za vzniku stejného grafitu v celém objemu odlitku, odpovídající kvalita povrchu, vnitřní struktura bez výrazných nespojitostí nebo nejsou vhodně upravené vzorky pro tahovou zkoušku.

To vše má v konečném řešení vliv na přesnost matematického modelu pevnosti (na hodnotu řešených konstant), s kterým bude kombinovaný strukturoskop spolupracovat. Jak tyto faktory ovlivnily věrohodnost modelů pevnosti všech sléváren je zřejmé z *tabulky 21*.

Cílem této diplomové práce je pak za pomoci získaných poznatků dokázat, pokud je to možné, zvýšení koeficientu korelace (významnosti) pro modely R_m jednotlivých sléváren.

Na základě experimentů doporučuji pro získání vyššího koeficientu korelace (vhodnějších konstant), tedy spolehlivosti konečného modelu pevnosti R_m tyto modifikace:

A. Z hlediska měřicího zařízení TELIT

Pokud by bylo možné, softwarově ošetřit silnou závislost hodnoty zbytkové magnetizace M , zjištěné pomocí přístroje DOMENA, na velikost tenkých stěn měřených odlitků. Doporučuji ošetření této závislosti podle již známého vztahu, který koriguje hodnotu M podle tloušťky stěny L (viz *vztah 33*), tím se eliminuje nutné zadávání konstant podle tloušťky stěny měřeného odlitku, což by i znamenalo urychlení měření. Dále byl zjištěn fakt, že přesnější měření (vyšší koeficient korelace) je při druhých magnetizacích M_2 . Proto dále doporučuji úpravu způsobu měření DOMENY na možnost dvojnásobného cyklu (nyní umožňuje jeden nebo pětinasobný cyklus).

$$M_k = \frac{M}{(81 \cdot L^{-2,9} + 1)} \quad (33)$$

B. Z hlediska metalurgie, stavu měřených vzorků imitujících stěny odlitků

Pro všechny vzorky: Eliminovat nepříznivý vliv kvality povrchu vzorků zbroušením této měřené lokální oblasti. Citlivěji přistupovat k výrobě zkušebních plochých tyček pro tahovou zkoušku, hlavně dodržet rovnoběžnost obráběných ploch.

Dále vytvořit sadu vzorků, u kterých bude zaručena širší škála vlastností. Tzn., aby měřená sada vzorků obsahovala jak perlitickou, tak i feritickou matici. U vzorků sléváren FEREX Liberec a FERAMO Brno byla zjištěna převážně matrice perlitická. Kdežto u vzorků slévárny TU Liberec byla matrice zcela konstantní a to feritická. Negativní vliv ledeburitické struktury na parametrizaci snížit co nejúčinnějším očkováním litiny.

+ pro vzorky slévárny FERAMO a TU: Dále se ukázalo, že jako nejvhodnějším polotovarem (odlitem) pro výrobu zkušebních vzorků je polotovar typu c, tedy vzorky ze slévárny FEREX Liberec. Tzn., že není vhodné pro tuto práci odlévat vzorky pro tahovou zkoušku jako samostatné desky (viz FERAMO Brno, TU Liberec), ale vytvořit tyto vzorky jako část z větších odlitků (FEREX, viz *obrázek 40*). Vnitřní nespojitosti typu ředin, které se nejvíce projevily u vzorků slévárny TU Liberec, eliminovat vhodným nálitkem, který zvýší dosazování kovu do formy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BÍLEK, D.: *Výzkum tloušťkoměru DIO 570 v ultrazvukové strukturoskopii litin*. TU v Liberci, 2006.
- [2] OBRAZ, J.: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. SNTL Praha, 1976.
- [3] DUBENSKÝ R., MINAŘÍK V., ČERMÁK F.: *Defektoskopie*. ČVUT Praha, 1987.
- [4] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura Praha, 2006.
- [5] Doc. Ing. SKRBEK, B., Ing. NOSEK, V.: *Lokální magnetická strukturoskopie, vliv kvality povrchu na výsledku*. Konference Defektoskopia, 2005.
- [6] NETÁHLO, P.: *Měření metodou magnetického bodového pólu na tenkých stěnách ocelí a litin*. TU v Liberci, 2006.
- [7] FLANDERKA, M.: *Magnetická strukturoskopie netryskaných výkovků a odlitků*. TU v Liberci, 2008.
- [8] ŘEZÁČ, Z.: *Pevnost přepážek válců motoru z různých období*. TU v Liberci, 2007.
- [9] Doc. Ing. SKRBEK, B.: *Nedestruktivní materiálová diagnostika litinových odlitků*. Disertační práce, VŠST Liberec, 1988.
- [10] Projekt F1 - 1.M/001. *Výzkum a zavedení výroby odlitků metodou INMOLD pro BONATRANS*. Dílčí zprávy, např. Kombinovaný strukturoskop TELIT - 1. Technický popis a návod k obsluze. ELKOSO s.r.o. Brno, 2006

9. PŘÍLOHY

- A. Tabulky naměřených výstupních hodnot M , L a Lu všech vzorků.
- B. Tabulky vypočtených hodnot c_L a E_0 všech vzorků.
- C. Tabulky naměřených pevností R_m u všech vzorků.
- D. Zkušební plochá tyčka slévárny FERAMO pro zkoušku v tahu.
Zkušební plochá tyčka slévárny FEREX pro zkoušku v tahu.
- E. Ukázky lomových ploch vzorků GJS a GJL.
- F. Výstupní data z naměřených hodnot všech zkoumaných vzorků pro matematický model pevnosti.

A.

Příloha 1 - Naměřené hodnoty magnetizace M na jednotlivých vzorkách slévárny FERAMO před rozřezáním

Orientační tloušťka [mm]	Označení vzorku		Jednotlivá měření [A/m]					
			1 – K		2 – Stř		3 – Z	
	Označení tavby	Počet vzorků	M1	M2	M1	M2	M1	M2
4	A345	a	221	212	200	210	257	223
		b	263	217	199	210	223	220
7		a	182	168	168	168	208	188
		b	190	179	168	169	191	179
12		a	161	153	156	136	150	139
		b	159	155	143	142	165	156
4	A027	a	241	228	219	212	249	228
		b	258	227	207	209	263	228
7		a	179	170	165	173	190	172
		b	181	162	165	156	183	173
12		a	152	145	135	145	173	163
		b	173	166	142	142	162	152
4	A338	a	289	275	247	250	289	265
		b	313	286	260	250	281	256
7		a	200	188	199	179	203	187
		b	202	194	196	178	199	188
12		a	168	159	151	158	183	176
		b	173	161	167	147	179	173

Příloha 2 - Naměřené hodnoty magnetizace M na jednotlivých vzorkách slévárny FERAMO po rozřezání, bez tepelného zpracování TZ

Orientační tloušťka [mm]	Označení vzorku		Jednotlivá měření [A/m]					
			1 - K		2 - Stř		3 - Z	
	Označení tavby	Počet vzorků	M3	M4	M3	M4	M3	M4
4	A345	P	229	211	234	208	226	215
		O	218	206	224	209	234	227
7		P	182	172	189	166	192	180
		O	194	188	185	169	186	175
12		P	169	163	173	158	172	166
		O	177	167	176	163	173	165
4	A027	P	248	226	251	237	259	250
		O	228	214	241	219	252	244
7		P	180	170	193	166	196	186
		O	189	180	185	167	195	188
12		P	136	131	148	131	146	138
		O	150	143	149	137	169	163
4	A338	P	312	289	330	280	297	280
		O	297	280	295	271	287	279
7		P	201	191	218	188	200	190
		O	193	184	191	177	188	181
12		P	161	149	162	156	164	161
		O	173	164	168	153	179	173

Na již rozřezaných deskách FERAMO se vždy provedla dvě měření, a to z obou stran vzorku (P-přední strana, O-obrácená strana).

Příloha 3 - Naměřené hodnoty magnetizace M na jednotlivých vzorkách slévárny FERAMO po žíhání k odstranění vnitřního pnutí

Orientační tloušťka [mm]	Označení vzorku		Jednotlivá měření [A/m]					
			1 - K		2 - Stř		3 - Z	
	Označení tavby	Počet vzorků	M3	M4	M3	M4	M3	M4
4	A345	P	246	212	222	194	250	222
		O	216	202	190	182	231	211
7		P	220	192	202	181	234	205
		O	211	190	202	182	214	197
12		P	223	193	203	181	215	199
		O	214	193	209	187	216	191
4	A027	P	257	220	238	207	277	247
		O	236	215	221	203	249	235
7		P	218	190	203	182	217	191
		O	199	179	195	179	206	188
12		P	174	150	156	139	170	151
		O	172	154	156	141	170	149
4	A338	P	359	315	325	290	311	271
		O	326	305	294	280	286	268
7		P	263	232	229	202	270	237
		O	238	214	221	202	237	217
12		P	196	171	168	152	202	181
		O	189	168	173	156	186	171

Příloha 4 - Naměřené hodnoty zbytkové magnetizace M, před rozřezáním na vzorkách slévárny FEREX

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Hodnoty M [A/m], místo a počet měření				Hodnota odchylky mezi M1 a M2 [A/m]	
		3 - Z		1 - K		Z	K
		M1	M2	M1	M2		
1	5	257	244	249	233	13	16
	10	196	178	196	187	18	9
	15	173	165	188	184	8	4
	20	170	161	167	160	9	7
2	5	256	245	235	231	11	4
	10	181	161	189	180	20	9
	15	175	162	175	167	13	8
	20	166	154	174	158	12	16
3	5	276	255	272	258	21	14
	10	185	169	190	179	16	11
	15	196	195	187	179	1	8
	20	164	155	181	171	9	10

Příloha 5 - Naměřené hodnoty zbytkové magnetizace M po rozřezání desek slévárny FEREX

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Hodnoty M [A/m]			Hodnoty M [A/m]				
		3 - Z			1 - K				
		P		O	P			O	
		M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
1	5	282	246	258	239	298	245	263	242
	10	209	181	189	169	245	208	218	203
	15	199	169	190	172	222	187	215	195
	20	178	162	172	160	205	174	194	174
2	5	317	276	287	266	290	245	264	243
	10	231	195	196	176	227	188	209	186
	15	196	172	193	173	218	189	206	181
	20	194	179	189	170	190	169	191	171
3	5	290	264	279	262	335	274	288	260
	10	204	181	190	175	241	203	218	193
	15	208	187	192	173	200	178	219	191
	20	183	163	182	169	185	166	194	178

Příloha 6 - Naměřené hodnoty L a Lu vzorků FERAMO Brno, před rozřezáním

Tavba	Orientační tloušťka [mm]		L [mm]		DIO 570 Lu [mm]		DIO 562 Lu [mm]	
			1 – K	3 – Z	1 – K	3 – Z	1 – K	3 – Z
A345	4	a	3,76	3,79	4,60	4,90	4,25	4,80
		b	3,76	3,74	4,60	4,80	4,26	4,49
	7	a	7,12	7,09	9,20	9,10	8,88	8,79
		b	7,04	7,04	9,10	9,20	8,69	8,88
	12	a	11,90	11,89	15,80	15,80	15,54	15,17
		b	11,86	11,89	15,80	15,80	15,54	15,54
A027	4	a	3,79	3,78	4,60	4,80	4,26	4,63
		b	3,89	3,85	4,60	4,80	4,25	4,72
	7	a	7,15	7,10	8,90	9,10	8,51	8,88
		b	7,16	7,24	8,80	9,10	8,70	8,88
	12	a	11,95	11,87	15,00	14,90	14,81	14,62
		b	11,93	11,85	14,9	15,00	14,62	15,09
A338	4	a	3,83	4,29	4,20	4,60	4,07	4,44
		b	3,78	4,28	4,10	4,80	3,89	4,72
	7	a	6,92	6,91	8,00	8,00	7,96	7,96
		b	6,95	6,97	8,00	8,00	7,96	7,96
	12	a	11,62	11,68	13,60	13,60	13,70	13,70
		b	11,63	11,69	13,50	13,50	13,51	13,51

Příloha 7 - Naměřené hodnoty L a Lu vzorků FERAMO Brno, po rozřezání s TZ

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Stav povrchu	Žiháno			
			L [mm]		Lu [mm]	
			1 – K	3 – Z	1 – K	3 – Z
A345	4	Licí	3,74	3,83	4,49	4,87
		Obrus	3,62	3,78	4,07	4,48
	7	Licí	7,00	7,06	9,81	10,00
		Obrus	7,03	7,01	9,00	9,25
	12	Licí	11,55	11,76	13,70	14,20
		Obrus	-	-	-	-
A027	4	Licí	3,84	3,87	4,68	5,05
		Obrus	3,73	3,75	4,26	4,67
	7	Licí	7,14	7,14	8,80	9,06
		Obrus	-	-	-	-
	12	Licí	11,94	11,96	14,99	14,81
		Obrus	-	-	-	-
A338	4	Licí	3,81	4,32	4,12	4,87
		Obrus	3,73	4,26	3,92	4,76
	7	Licí	6,92	7,05	8,62	8,88
		Obrus	-	-	-	-
	12	Licí	11,80	11,90	15,55	15,90
		Obrus	-	-	-	-

Příloha 8 - Naměřené hodnoty L a Lu vzorků FERAMO Brno, po rozřezání bez TZ

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Stav povrchu	Nežítáno			
			L [mm]		Lu [mm]	
			1 – K	3 - Z	1 – K	3 - Z
A345	4	Licí	3,77	3,73	4,30	4,86
		Obrus	-	-	-	-
	7	Licí	7,10	7,15	9,06	9,25
		Obrus	-	-	-	-
	12	Licí	11,66	11,86	14,07	14,25
		Obrus	-	-	-	-
A027	4	Licí	3,93	3,65	4,48	4,58
		Obrus	-	-	-	-
	7	Licí	7,22	7,30	8,95	9,43
		Obrus	-	-	-	-
	12	Licí	12,05	12,18	14,99	15,64
		Obrus	-	-	-	-
A338	4	Licí	3,73	4,17	4,11	4,48
		Obrus	-	-	-	-
	7	Licí	7,00	7,12	8,14	8,32
		Obrus	-	-	-	-
	12	Licí	11,93	12,09	15,18	16,29
		Obrus	-	-	-	-

Příloha 9 - Naměřené hodnoty L a Lu vzorků FEREX Liberec

Tavba	Tloušťka [mm]	L [mm]		DIO 570 Lu [mm]		DIO 562 Lu [mm]	
		3 – Z	1 - K	3 - Z	1 - K	3 – Z	1 - K
1	5	4,94	4,96	6,20	6,40	6,11	6,29
	10	10,03	11,00	14,10	15,40	12,77	14,07
	15	15,34	15,14	21,40	21,40	20,36	20,36
	20	20,39	20,27	28,80	28,10	27,39	26,93
2	5	4,88	5,21	5,70	6,20	5,74	6,11
	10	9,59	10,20	11,60	12,30	11,11	12,03
	15	15,12	14,92	18,90	17,80	17,58	17,40
	20	20,11	20,26	25,50	25,90	24,25	24,80
3	5	4,96	4,71	6,10	5,80	5,92	5,74
	10	10,86	10,35	13,10	12,80	12,77	12,40
	15	15,47	16,44	20,40	21,50	18,88	19,90
	20	20,58	21,28	26,80	27,20	25,54	25,91

Příloha 10 - Naměřené hodnoty ultrazvukových drah Lu a L vzorků GJS

Série - JSV	DIO 562 [mm]					
destička t [mm]	L začátek	Lu začátek	L konec	Lu konec	L stř	Lu stř
3	2,9	3,2	2,9	3,1	-	-
4	4,2	4,6	3,7	4,0	-	-
5	5,4	5,7	4,7	5,0	-	-
8	8,0	8,4	7,6	8,0	-	-
10	10,7	11,4	11,2	11,6	-	-
Série JS17	DIO 562 [mm]					
destička t [mm]	L začátek	Lu začátek	L konec	Lu konec	L stř	Lu stř
3	2,8	3,2	2,9	3,1	10,06	10,46
4	4,1	4,4	3,5	3,9	9,99	10,37
5	5,4	5,6	5,3	5,5	10,02	10,46
8	7,8	8,1	7,7	8,1	10,1	10,55
10	10,4	11,0	10,2	10,6	10,08	10,53
Série JS18	DIO 562 [mm]					
destička t [mm]	L začátek	Lu začátek	L konec	Lu konec	L stř	Lu stř
3	4,0	4,3	3,0	3,4	9,9	10,37
4	5,4	5,6	3,9	4,4	9,76	10,18
5	6,6	7,0	5,2	5,6	9,89	10,37
8	8,8	9,3	7,6	7,9	9,95	10,37
10	11,5	12,0	10,3	10,7	9,88	10,31
Série JS19	DIO 562 [mm]					
destička t [mm]	L začátek	Lu začátek	L konec	Lu konec	L stř	Lu stř
3	3,4	3,7	3,0	3,1	9,75	10,18
4	4,4	4,8	4,0	4,1	7,88	10,18
5	5,5	5,6	5,0	5,2	9,65	10,0
8	8,0	8,3	7,3	7,6	10,0	10,38
10	10,5	10,9	10,0	10,4	9,82	10,31
Série JS20	DIO 562 [mm]					
destička t [mm]	L začátek	Lu začátek	L konec	Lu konec	L stř	Lu stř
3	3,4	3,6	2,9	3,2	9,93	10,18
4	4,4	4,8	3,6	3,8	9,88	10,18
5	5,3	5,6	4,6	5,0	9,65	10,0
8	7,9	8,4	7,3	7,6	10,0	10,38
10	10,2	10,6	9,7	10,0	9,82	10,31
Série JS21	DIO 562 [mm]					
destička t [mm]	L začátek	Lu začátek	L konec	Lu konec	L stř	Lu stř
3	3,2	3,4	3,0	3,1	9,85	10,37
4	4,2	4,4	3,8	3,9	9,83	10,18
5	4,8	5,0	5,2	5,4	9,74	10,18
8	7,3	7,5	7,7	8,0	9,73	10,27
10	9,7	10,0	10,1	10,4	10,0	10,37

Příloha 11 - Naměřené hodnoty zbytkové magnetizace M vzorků GJS

Série - JSV	DOMENA [A/m]					
destička t [mm]	M ₁ -začátek	M ₂ -začátek	M ₁ -střed	M ₂ -střed	M ₁ -konec	M ₂ -konec
3	112,0	108,0	145,0	137,0	191,0	177,0
4	80,4	76,0	101,0	98,1	131,0	123,0
5	73,5	71,9	93,2	94,0	104,0	90,9
8	53,2	56,3	54,7	52,6	67,7	66,4
10	53,2	51,0	49,6	47,4	52,5	56,9
Série JS17	DOMENA [A/m]					
destička t [mm]	M ₁ -začátek	M ₂ -začátek	M ₁ -střed	M ₂ -střed	M ₁ -konec	M ₂ -konec
3	71,9	71,2			97,8	97,8
4	61,1	59,7			69,0	64,7
5	43,1	44,0			48,9	48,9
8	38,8	36,6			42,4	39,5
10	41,4	38,1			38,8	39,5
Série JS18	DOMENA [A/m]					
destička t [mm]	M ₁ -začátek	M ₂ -začátek	M ₁ -střed	M ₂ -střed	M ₁ -konec	M ₂ -konec
3	66,4	64,5			94,3	89,3
4	50,3	48,2			67,3	63,8
5	47,5	46,0			55,1	54,6
8	42,5	38,2			45,3	43,2
10	39,0	36,8			43,9	41,1
Série JS19	DOMENA [A/m]					
destička t [mm]	M ₁ -začátek	M ₂ -začátek	M ₁ -střed	M ₂ -střed	M ₁ -konec	M ₂ -konec
3	71,6	65,9			85,1	80,8
4	60,2	56,0			73,7	67,3
5	48,2	43,5			60,2	59,5
8	46,8	47,5			58,8	56,7
10	46,7	46,7			41,1	41,1
Série JS20	DOMENA [A/m]					
destička t [mm]	M ₁ -začátek	M ₂ -začátek	M ₁ -střed	M ₂ -střed	M ₁ -konec	M ₂ -konec
3	85,5	79,0			107,0	99,0
4	54,5	58,1			85,8	82,2
5	51,0	48,5			72,8	72,3
8	51,0	48,9			62,4	57,4
10	46,0	43,2			61,7	58,6
Série JS21	DOMENA [A/m]					
destička t [mm]	M ₁ -začátek	M ₂ -začátek	M ₁ -střed	M ₂ -střed	M ₁ -konec	M ₂ -konec
3						
4	71,3	69,1			88,0	83,5
5	79,5	75,8			63,9	57,9
8	56,5	55,0			64,6	58,7
10						

B.

Příloha 12 - Vypočtená rychlost šíření ultrazvukových vln c_L u vzorků FERAMO Brno, před rozřezáním

Označení tavby	Tloušťka [mm]		DIO 570 c_L [m/s]		DIO 562 c_L [m/s]	
			1 - Konec	3 - Vtok	1 – Konec	3 - Vtok
A345	4	a	4839,0	4578,9	5237,5	4674,3
		b	4839,0	4612,7	5225,2	4931,1
	7	a	4581,6	4612,4	4746,7	4775,1
		b	4579,9	4530,1	4795,9	4693,3
	12	a	4458,7	4455,0	4533,3	4640,0
		b	4443,7	4455,0	4518,1	4529,5
A027	4	a	4877,6	4662,0	5266,9	4833,2
		b	5006,3	4748,3	5418,5	4828,8
	7	a	4756,0	4618,9	4973,9	4733,3
		b	4816,7	4710,0	4872,1	4826,7
	12	a	4716,3	4716,1	4776,8	4806,5
		b	4740,0	4676,8	4830,8	4648,9
A338	4	a	5398,5	5521,0	5570,9	5720,0
		b	5458,0	5278,7	5752,6	5368,1
	7	a	5120,8	5113,4	5146,5	5139,1
		b	5143,0	5157,8	5168,8	5183,7
	12	a	5058,1	5084,2	5021,2	5047,1
		b	5100,0	5126,3	5096,2	5122,5

Příloha 13 - Vypočtená rychlost šíření ultrazvukových vln c_L u vzorků FERAMO Brno, po rozřezání: porovnání mezi vzorky bez TZ a s TZ

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Stav povrchu	c_L [m/s]			
			Nežiháno		Žiháno	
			1 – K	3 - Z	1 – K	3 - Z
A345	4	Licí	5190,3	4543,5	4931,1	4655,8
		Obrus	x	x	5265,5	4995
	7	Licí	4639,3	4576	4224,3	4179,5
		Obrus	x	x	4624,2	4486,4
	12	Licí	4906	4927,1	4991	4902,8
		Obrus	x	x	x	x
A027	4	Licí	5193,2	4717,9	4857,4	4536,7
		Obrus	x	x	5183,5	4753,8
	7	Licí	4775,7	4582,8	4803,3	4665,4
		Obrus	x	x	x	x
	12	Licí	4758,9	4610,3	4715,5	4780,8
		Obrus	x	x	x	x
A338	4	Licí	5372,7	5510,4	5474,6	5251,4
		Obrus	x	x	5633,1	5298,2
	7	Licí	5090,9	5066,2	4752,5	4700
		Obrus	x	x	x	x
	12	Licí	4652,5	4393,7	4492,3	4430,7
		Obrus	x	x	x	x

Příloha 14 - Vypočtené hodnoty rychlosti ultrazvuku c_L ve vzorcích FEREX Liberec

Označení tavby	Tloušťka [mm]	DIO 570 c_L [m/s]		DIO 562 c_L [m/s]	
		1 – Konec	3 – Vtok	1 – Konec	3 - Vtok
1	5	4588,0	4716,9	4668,2	4786,4
	10	4228,6	4211,2	4628,3	4649,8
	15	4188,3	4243,6	4402,2	4460,4
	20	4270,4	4191,3	4455,9	4407,0
2	5	4974,7	5068,4	5048,0	5033,0
	10	4909,3	4894,2	5019,5	5110,1
	15	4962,2	4736,0	5076,2	5091,6
	20	4630,9	4668,7	4836,3	4909,3
3	5	4807,4	4813,6	4857,7	4960,0
	10	4786,9	4907,7	4941,3	5034,5
	15	4526,7	4489,3	4890,7	4850,8
	20	4631,5	4546,0	4862,1	4770,3

Příloha 15 - Vypočtený počáteční modul E_0 u vzorků slévárny FERAMO, před rozřezáním

Označení tavby	Tloušťka [mm]		DIO 570 E_0 [GPa]		DIO 562 E_0 [GPa]	
			1 - Konec	3 - Vtok	1 – Konec	3 - Vtok
A345	4	a	158,9	142,2	186,1	148,2
		b	158,9	144,3	185,2	165,0
	7	a	142,4	144,3	152,8	154,7
		b	142,3	139,2	156,0	149,4
	12	a	134,9	134,6	139,4	146,1
		b	134,0	134,6	138,5	139,2
A027	4	a	168,1	153,6	196,0	165,0
		b	177,1	159,3	207,4	164,7
	7	a	159,8	150,7	174,8	158,3
		b	163,9	156,7	167,7	164,6
	12	a	157,1	157,1	161,2	163,2
		b	158,7	154,5	164,9	152,7
A338	4	a	201,6	210,9	214,7	226,4
		b	206,1	192,8	228,9	199,4
	7	a	181,4	180,9	183,2	182,7
		b	183,0	184,0	184,8	185,9
	12	a	177,0	178,8	174,4	176,2
		b	179,9	181,8	179,7	181,5

Příloha 16 - Vypočtený počáteční modul E_0 u vzorků slévárny FERAMO, po rozřezání

Tavba	Orientační tloušťka [mm]	Stav povrchu	E_0 [GPa]			
			Nežiháno		Žiháno	
			1 – K	3 - Z	1 – K	3 - Z
A345	4	Licí	182,8	140,0	166,8	148,7
		Obrus	x	x	190,2	171,1
	7	Licí	146,0	142,1	122,4	119,8
		Obrus	x	x	146,7	138,1
	12	Licí	163,3	164,7	170,9	164,9
		Obrus	x	x	x	x
A027	4	Licí	190,5	157,3	164,9	143,8
		Obrus	x	x	187,8	157,9
	7	Licí	161,1	148,4	161,2	152,1
		Obrus	x	x	x	x
	12	Licí	160,0	150,2	155,4	159,7
		Obrus	x	x	x	x
A338	4	Licí	199,7	210,1	207,5	190,9
		Obrus	x	x	219,7	194,4
	7	Licí	179,3	177,6	156,4	152,9
		Obrus	x	x	x	x
	12	Licí	149,8	133,6	139,7	135,9
		Obrus	x	x	x	x

Příloha 17 - Vypočtený počáteční modul E_0 u vzorků slévárny FEREX, porovnání hodnot měřených na LP (litém povrchu) a OP (obrobený povrchu)

Označení tavby	Tloušťka [mm]	DIO 570 E_0 [GPa] - LP		DIO 562 E_0 [GPa] - LP	
		1 – Konec	3 – Vtok	1 – Konec	3 - Vtok
1	5	115,1	121,7	119,2	125,3
	10	97,8	97,0	117,2	118,2
	15	95,9	98,5	106,0	108,8
	20	99,7	96,1	108,6	106,2
2	5	135,3	140,5	139,4	138,5
	10	131,8	131,0	137,8	142,8
	15	134,7	122,7	140,9	141,8
	20	117,3	119,2	127,9	131,8
3	5	126,4	126,7	129,1	134,5
	10	125,3	131,7	133,5	138,6
	15	112,1	110,2	130,8	128,7
	20	117,3	113,0	129,3	124,5
Označení tavby	Tloušťka [mm]	DIO 570 E_0 [GPa] – měřeno na OP			
		1 – Konec		3 – Vtok	
1	5	102,4		117,4	
	10	104,5		110,0	
	15	100,4		106,9	
	20	108,2		107,0	
2	5	119,4		120,8	
	10	128,7		127,5	
	15	128,3		128,5	
	20	124,6		100,1	
3	5	99,4		114,0	
	10	127,7		124,6	
	15	128,0		128,0	
	20	130,9		125,1	

Příloha 18 - Vypočtené hodnoty E_0 pro vzorky slévárny TU, GJS

Série	Tloušťka [mm]	E_{0Z} [GPa]	E_{0K} [GPa]
JSV	3	160,73	175,3
	4	169,7	174,8
	5	180,3	176,4
	8	182,2	180,1
	10	177,31	184,62
JS17	3	156,46	179,03
	4	172,17	163,06
	5	188,18	183,11
	8	180,43	182,59
	10	176,01	183,65
JS18	3	171,92	149,08
	4	186,77	154,36
	5	175,07	174,59
	8	180,45	183,27
	10	181,87	183,5
JS19	3	165,25	181,92
	4	168,73	194,14
	5	191	186,66
	8	183,12	182,68
	10	181,34	182,66
JS20	3	171,55	167,84
	4	165,7	174,78
	5	177,2	167,34
	8	173,38	182,68
	10	184,38	184,79
JS21	3	182,95	187,87
	4	177,15	189,96
	5	182,4	186,4
	8	184,59	185,83
	10	186,27	187,82

C.

Příloha 19 – Naměřené hodnoty pevnostních vlastností vzorků slévárny FERAMO

Tavba	Tloušťka [mm]	TZ	Stav lomu	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
A345	4	N	destrukce po obrábění			
	7		V	171,4	0	0
	12		-	227,2	196,8	0,41
A027	4	N	-	273,3	270,0	0,32
	7		-	197,5	196,8	0,24
	12		-	176,6	159,4	0,38
A338	4	N	L	257,5	0	0
	7		-	238,3	0	0
	12		-	148,0	147,3	0,24
A345	4	Ž	L, O	265,7	0	0
	7		Ř (10)	158,4	0	0
	12		-	195,9	0	0
A027	4	Ž	V	222,8	0	0
	7		-	206,0	0	0
	12		-	173,1	0	0
A338	4	Ž	L, O	217,3	0	0
	7		-	237,4	118,5	0,2
	12		-	147,9	112,1	0,19

Legenda (stav lomu): V - Vměstek
 L - Ledeburit (bílý lom)
 Ř - Ředina (%)
 O - Lom přes vyvrtaný otvor

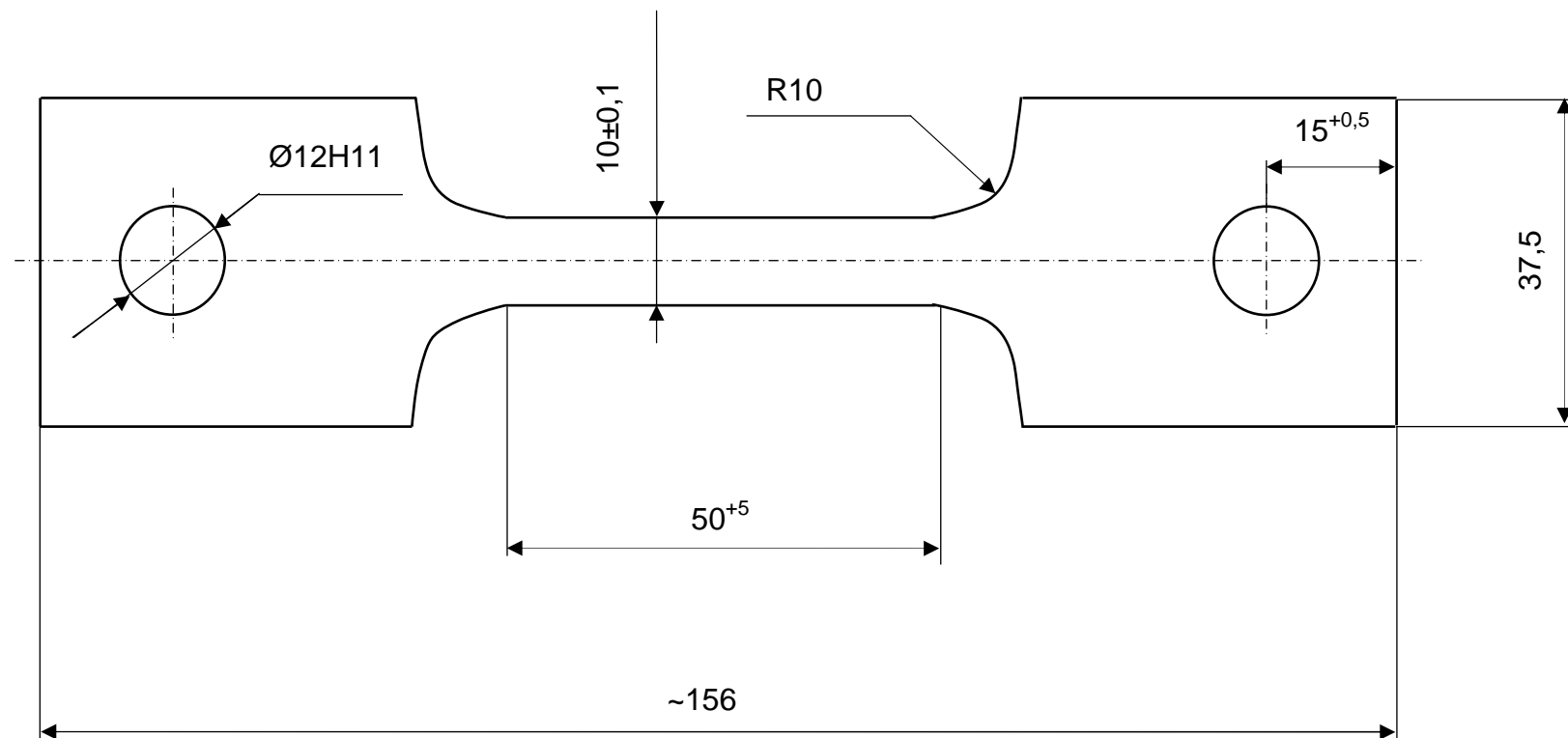
Příloha 20 - Naměřené hodnoty pevnostních vlastností vzorků slévárny FEREX

Tavba	Tloušťka [mm]	Měřená oblast	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
1	5	Z	280,2	245,7	0,44
	5	K	281,3	0	0
	10	Z	235,5	188,7	0,6
	10	K	241,1	193,9	0,52
	15	Z	211,7	179,7	0,55
	15	K	222,2	219,5	0,26
	20	Z	195,9	0	0
	20	K	170,9	0	0
2	5	Z	353,8	0	0
	5	K	350,3	0	0
	10	Z	315,6	0	0
	10	K	309,1	0	0
	15	Z	298,3	0	0
	15	K	234,5	0	0
	20	Z	279,0	0	0
	20	K	309,7	0	0
3	5	Z	305,6	0	0
	5	K	308,1	0	0
	10	Z	284,0	0	0
	10	K	297,9	0	0
	15	Z	285,0	0	0
	15	K	298,2	0	0
	20	Z	284,3	0	0
	20	K	290,9	0	0

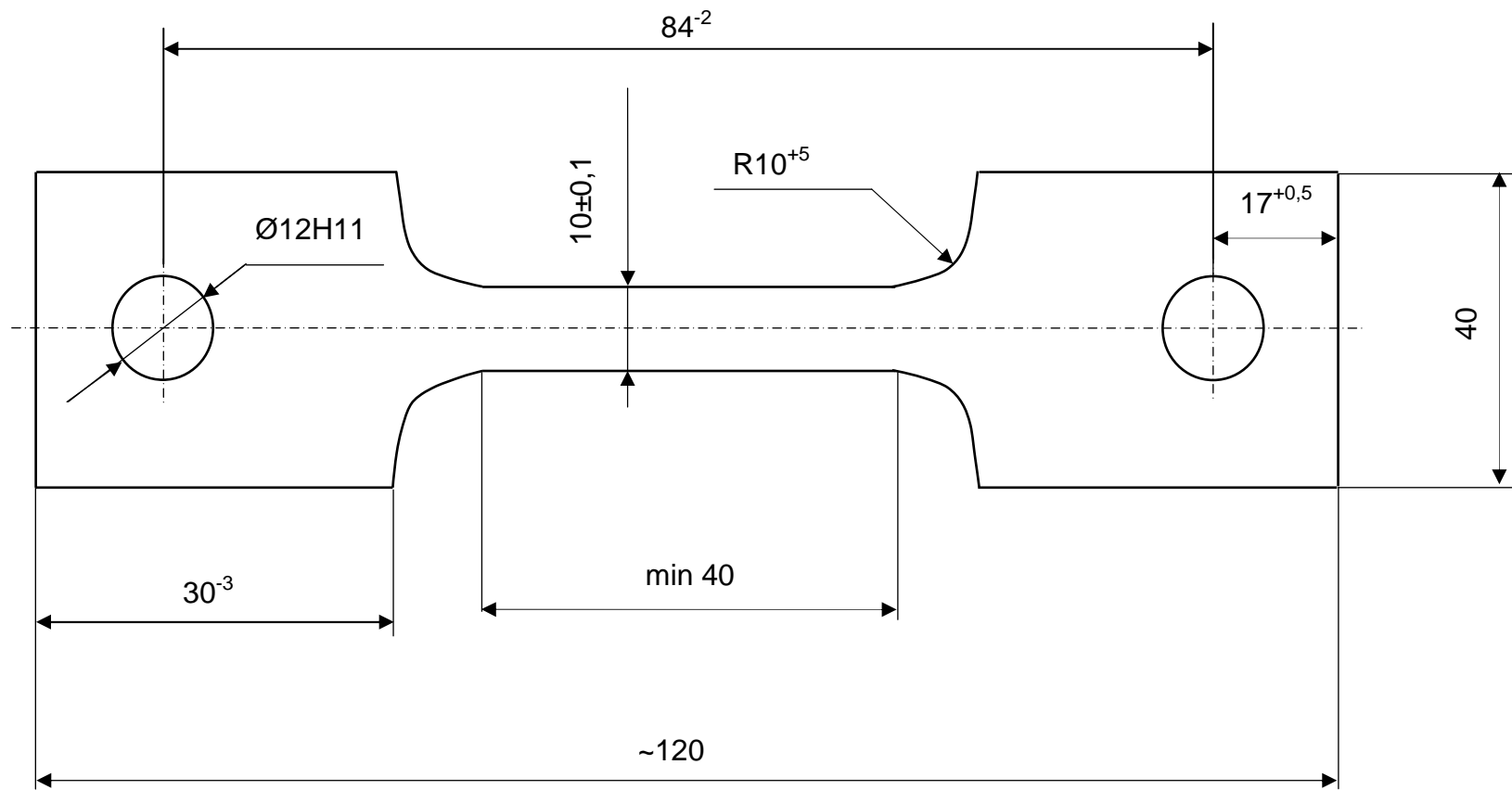
Příloha 21 - Naměřené hodnoty pevnostních vlastností vzorků GJS, porovnání mezi žíhanými a nežíhanými vzorky

Série - JSV	Před žíháním			Po žíhání		
destička t [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
3	468	271	1,7	-	-	-
4	460	230	2,7	-	-	-
5	452	211	3,8	-	-	-
8	367	183	1,8	-	-	-
10	396	231	4,8	-	-	-
Série JS17	Před žíháním			Po žíhání		
destička t [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
3	462	293	0,6	399	-	-
4	404	206	0,4	409	-	-
5	481	288	1,0	383	366	0,6
8	393	113	0,4	391	373	0,2
10	493	58	1,8	493	-	-
Série JS18	Před žíháním			Po žíhání		
destička t [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
3	505	246	5,4	557	438	3,4
4	523	247	6,1	532	416	4,3
5	472	229	3,3	525	410	3,4
8	492	311	5,4	520	405	4,9
10	381	297	2,0	414	373	1,9
Série JS19	Před žíháním			Po žíhání		
destička t [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
3	560	267	2,8	561	474	1,9
4	568	289	4,7	494	453	0,5
5	439	167	0,8	-	-	-
8	304	188	0,3	472	431	0,7
10	418	285	2,9	443	432	0,3
Série JS20	Před žíháním			Po žíhání		
destička t [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
3	542	264	3,4	549	432	3,1
4	570	205	6,5	535	425	3
5	553	157	7,7	505	419	0,2
8	391	311	0,3	357	320	0,9
10	354	220	1,5	373	332	1,1
Série JS21	Před žíháním			Po žíhání		
destička t [mm]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]
3	538	220	2,3	633	460	3,8
4	484	267	1,0	540	452	2,1
5	523	289	2,9	600	453	3,1
8	488	194	1,8	453	409	1,6
10	428	263	1,9	380	337	1,5

D.



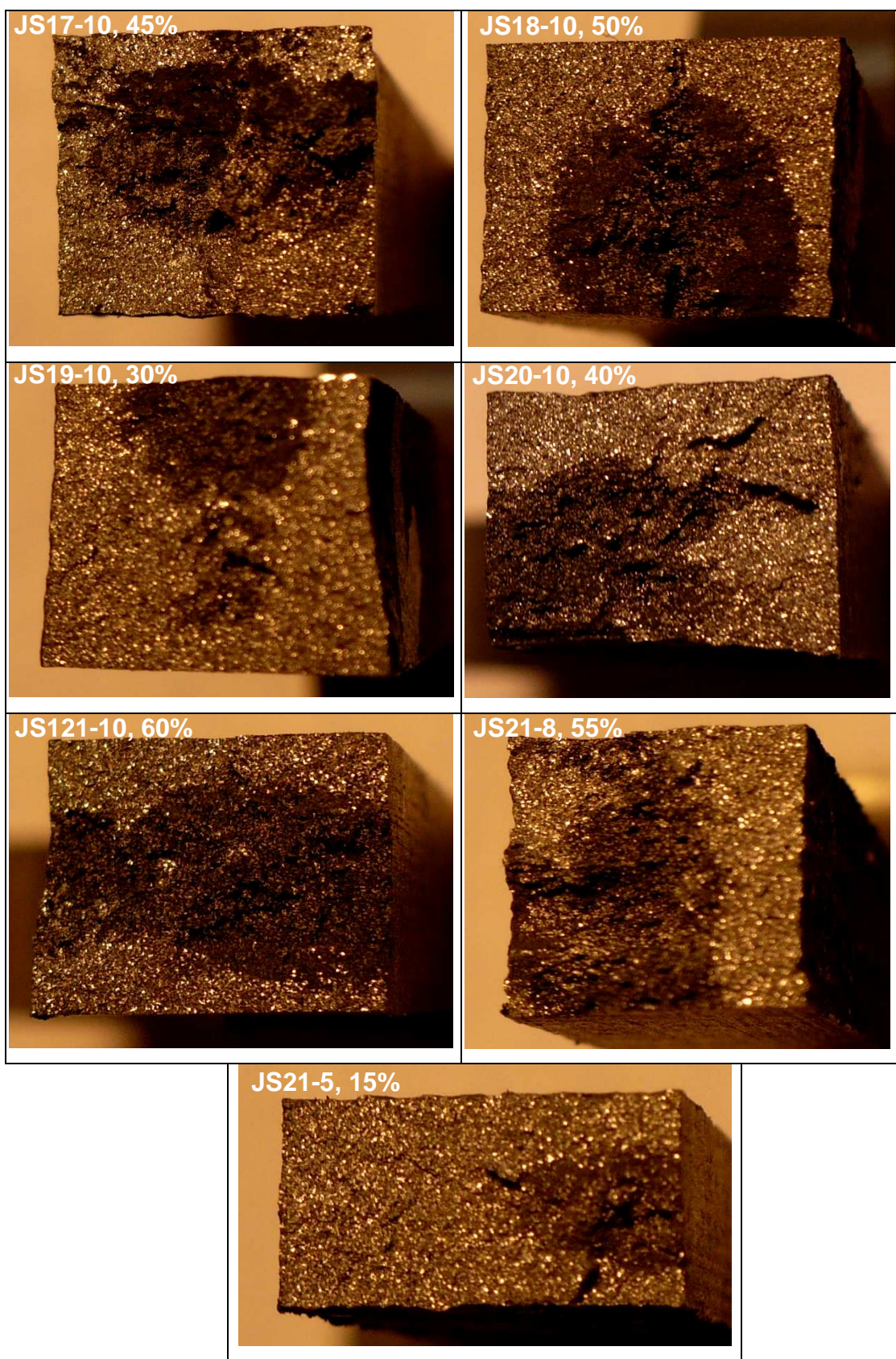
Příloha 22 – Zkušební tyčky pro zkoušku v tahu pro získání hodnoty meze pevnosti R_m u vzorků slévárny FERAMO




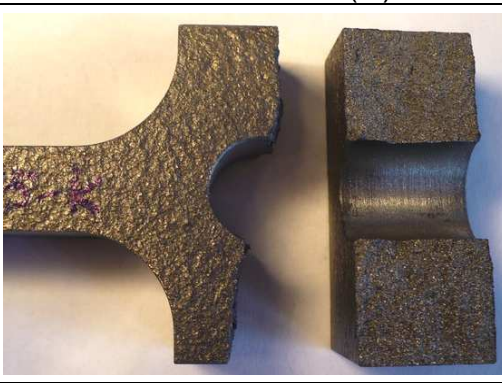


Příloha 23 – Zkušební tyčky pro získání hodnoty meze pevnosti R_m u vzorků slévárny FEREX

E.

Příloha 24 – Vybrané lomové plochy vzorků GJS s největším podílem ředin



Příloha 25 – Vybrané lomové plochy a způsob porušení vzorků GJL

FERAMO	FEREX
A345 – 4 (L, O)	Tavba 3 - 15 - K (O)
	
A345 – 7 (Ř)	Tavba 2 - 5 - Z (O)
	

F.*Příloha 26 - Výstupní veličiny z měření vzorků slévárny FERAMO Brno*

Tavba	Tloušťka [mm]	Naměřené hodnoty				Modely R_m
		X1 (L/Lu)	TZ	X2 (HB)	Y (Rm)	
A345	4	0,79685	Nežíhané	378	x	R_{mGJL}
	7	0,77297		222	171,35	
	12	0,75222		209	227,19	
A027	4	0,81479		266	273,3	
	7	0,79821		236	197,48	
	12	0,79600		207	176,61	
A338	4	0,91453		444	257,51	R_{mGJN}
	7	0,86719		350	238,29	
	12	0,86016		244	147,96	

Příloha 27 - Výstupní veličiny z měření vzorků slévárny FEREX Liberec

Tavba	Tloušťka [mm]	Naměřené hodnoty				Modely R_m
		X1 (L/Lu)	oblast	X2 (HB)	Y (Rm)	
1	5	0,79677	Z	217	280,2	$R_{m,FEREX}$
		0,77500	K	227	281,3	
	10	0,71135	Z	217	235,5	
		0,71429	K	229	241,1	
	15	0,71682	Z	200	211,7	
		0,70748	K	229	222,2	
	20	0,70799	Z	222	195,9	
		0,72135	K	217	170,9	
2	5	0,85614	Z	266	353,8	
		0,84032	K	252	350,3	
	10	0,82672	Z	272	315,6	
		0,82927	K	263	309,1	
	15	0,80000	Z	252	298,3	
		0,83820	K	246	234,5	
	20	0,78863	Z	224	279,0	
		0,78224	K	255	309,7	
3	5	0,81311	Z	269	305,6	
		0,81207	K	269	308,1	
	10	0,82901	Z	249	284,0	
		0,80859	K	252	297,9	
	15	0,75833	Z	255	285,0	
		0,76465	K	269	298,2	
	20	0,76791	Z	241	284,3	
		0,78235	K	252	290,9	

Příloha 28 - Výstupní veličiny z měření vzorků slévárny TU

Série	Tloušťka [mm]	Naměřené hodnoty			Modely R _m
		X1 (L/Lu)	X2 (HB)	Y (Rm)	
JSV	3	0,92096	192	468	R _{m:3,4,5}
	4	0,93266	187	460	
	5	0,94902	181	452	
JS17	3	0,91985	209	462	
	4	0,91994	215	404	
	5	0,96909	213	481	
JS18	3	0,89853	194	505	
	4	0,92703	199	523	
	5	0,93961	198	472	
JS19	3	0,93599	201	560	
	4	0,95661	210	568	
	5	0,97651	212	439	
JS20	3	0,92569	198	542	
	4	0,92712	196	570	
	5	0,93397	199	553	
JS21	3	0,96761	207	538	
	4	0,96263	199	484	
	5	0,96498	198	523	
JSV	8	0,95648	171	367	R _{m:8,10}
	10	0,95592	171	396	
JS17	8	0,95740	215	393	
	10	0,95291	211	493	
JS18	8	0,95831	200	492	
	10	0,96048	198	381	
JS19	8	0,96105	213	304	
	10	0,95869	208	418	
JS20	8	0,94809	198	391	
	10	0,96546	199	354	
JS21	8	0,96709	195	488	
	10	0,97143	193	428	

